

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Vindiš**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Marko Vindiš

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, dipl. ing. te asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na pruženoj pomoći, savjetima i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada te svojoj obitelji i prijateljima.

Marko Vindiš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Vindiš** Mat. br.: 0035190468

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj dodatnog materijala na deformacije pri zavarivanju konstrukcijskog čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the Filler Material on Distortions during Welding of Structural Steel**

Opis zadatka:

Detaljno proučiti i opisati vrste deformacija pri zavarivanju kao i mehanizme njihovog nastanka. Obraditi primjenu numeričkih simulacija koje se koriste pri oblikovanju tehnologije zavarivanja. Objasniti kriterije odabira postupka zavarivanja i dodatnog materijala pri višeprolaznom zavarivanju konstrukcijskog čelika.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odrediti optimalnu tehnologiju zavarivanja za niz različitih dodatnih materijala. Na uzorcima od konstrukcijskog čelika ispitati utjecaj dodatnog materijala na konačne deformacije pri višeprolaznom zavarivanju. Pomoću programskog paketa Welding Solution simulirati provedene procese zavarivanja te rezultate simulacije usporediti s eksperimentalnim vrijednostima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zdao:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

1. NUMERIČKE SIMULACIJE U ZAVARIVANJU .....	1
1.1 Uvod .....	1
1.2 Metoda konačnih elemenata .....	2
1.3 Aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja .....	3
1.3.1 Sysweld (Visual Environment) .....	4
1.3.2 Ostale aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja .....	5
2. DEFORMACIJE .....	7
2.1 Fizička svojstva materijala i deformacije .....	8
2.1.1 Granica razvlačenja .....	8
2.1.2 Koeficijent toplinskog rastezanja .....	8
2.1.3 Toplinska vodljivost .....	8
2.2 Vrste deformacija .....	9
2.2.1 Longitudinalna (uzdužna) kontrakcija i savijanje .....	9
2.2.2 Poprečna kontrakcija i rotacijska deformacija .....	11
2.2.3 Iskrivljenje .....	14
2.2.4 Kutna deformacija .....	15
2.3 Smanjivanje iznosa deformacija .....	15
2.3.1 Prevencija deformacija prije zavarivanja .....	15
2.3.2 Smanjivanje deformacija prilikom zavarivanja .....	17
2.3.3 Otklanjanje deformacija nakon zavarivanja .....	18
2.4 Tehnike mjerenja deformacija .....	19
3. ODABIR POSTUPKA ZAVARIVANJA .....	21
4. KONSTRUKCIJSKI ČELIK .....	23
4.1 Zavarljivost feritnih čelika .....	24
4.2 Mikrostruktura i mehanička svojstva konstrukcijskih čelika .....	24
4.3 Podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije .....	27
5. ODABIR DODATNOG MATERIJALA .....	28
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	30

5.1 Provedba zavarivanja .....	30
5.1.1 Zavarivanje spoja 1 .....	34
5.1.2 Zavarivanje spoja 2 .....	37
5.1.3 Zavarivanje spoja 3 .....	40
5.1.4 Mjerenje deformacija .....	42
5.1.5 Makroanaliza .....	46
5.2 Simulacija zavarivanja .....	49
5.2.1 Visual – Mesh .....	49
5.2.2 Visual – Weld .....	57
5.2.3 Visual – Viewer .....	65
ZAKLJUČAK .....	70

## POPIS SLIKA

Slika 1. Izgled modela nastalog metodom konačnih elemenata [1] .....	2
Slika 2. Osnovni konačni elementi [2] .....	3
Slika 3. Grafičko korisničko sučelje Visual Weld - a [5].....	5
Slika 4. Grafičko korisničko sučelje SORPAS -a [3].....	6
Slika 5. Grafičko korisničko sučelje Simufact.welding – a [4].....	6
Slika 6. Sučeljeni „V“ zavar 1 [7] .....	7
Slika 7. Sučeljeni „V“ zavar 2 [7] .....	7
Slika 8. Shematski prikaz savijanja [7] .....	9
Slika 9. Shematski prikaz longitudinalne kontrakcije [8] .....	9
Slika 10. Utjecaj postupka zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu uzdužne deformacije [6] .....	10
Slika 11. Savijanje [9]: .....	11
Slika 12. Utjecaj redoslijeda zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu uzdužne deformacije [6] .....	11
Slika 13. Poprečna kontrakcija (a) i rotacijska deformacija (b) sučeljenog spoja [10, 7].....	12
Slika 14. Sprječavanje poprečne deformacije [7].....	12
Slika 15. Utjecaj postupka zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu poprečne deformacije [6] .....	13
Slika 16. Utjecaj redoslijeda zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu poprečne deformacije [6] .....	13
Slika 17. Shematski prikaz iskrivljenja [8] .....	14
Slika 18. Realni primjer iskrivljenja [11].....	14
Slika 19. Metoda sprječavanja iskrivljenja [7].....	14
Slika 20. Naprezanja i deformacije kutnog spoja [7] .....	15
Slika 21. Radni komadi su prethodno deformirani i stegnuti [7] .....	16
Slika 22. Sprečavanje neželjenih deformacija namještanjem radnih komada [7].....	17
Slika 23. Metode zavarivanja „lutanjem“ [7]:.....	17
Slika 24. Kombinacija na preskok i metode povratnog koraka [7] .....	18
Slika 25. Mjerenje kutne deformacije [10].....	19
Slika 26. Postupak mjerenja kutne deformacije: [10] .....	20

Slika 27. Mjerenje savijanja [12] .....	20
Slika 28. Tipična feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika [14] .	25
Slika 29. Veličina zavora u ovisnosti o čvrstoći dodatnog materijala [18] .....	29
Slika 30. Priprema spoja za sučeljeno zavarivanje .....	30
Slika 31. Prikaz robotske stanice [19] .....	31
Slika 32. Izvor struje za zavarivanje MIG/MAG VPS 4000 digit .....	32
Slika 33. Dodavač žice .....	33
Slika 34. 568 Infrared Therometer [20] .....	33
Slika 35. Spoj 1 pripremljen za zavarivanje .....	34
Slika 36. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 1 .....	36
Slika 37. Iskrivljenje spoja 1 .....	36
Slika 38. Savijanje spoja 1 .....	36
Slika 39. Pripremljeni spoj 2 za zavarivanje .....	37
Slika 40. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 2 .....	38
Slika 41. Iskrivljenje spoja 2 .....	39
Slika 42. Savijanje spoja 2 .....	39
Slika 43. Pripremljeni spoj 3 za zavarivanje .....	40
Slika 44. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 3 .....	41
Slika 45. Iskrivljenje spoja 3 .....	42
Slika 46. Savijanje spoja 3 .....	42
Slika 47. Točke mjerenja deformacija .....	43
Slika 48. Metoda izračuna deformacija .....	43
Slika 49. Plinsko rezanje traka .....	46
Slika 50. Makroizbrusak 1 (SG2 dodatni materijal) .....	47
Slika 51. Makroizbrusak 2 (Lincoln MIG 309LSi dodatni materijal) .....	48
Slika 52. Makroizbrusak 3 (Megafil – 550R dodatni materijal) .....	48
Slika 53. Prikaz opcije „Sweep“ .....	50
Slika 54. Prikaz opcije „Blend“ .....	50
Slika 55. Kreirana 2D mreža .....	51
Slika 56. Način povećanja konačnih elemenata .....	51
Slika 57. Tlocrt modela .....	52
Slika 58. Kreirani model spoja (izometrija) .....	52
Slika 59. Prikaz prolaza za simulaciju zavarivanja .....	53



Slika 60. Izrada kolektora osnovnog materijala ploče 1 .....	53
Slika 61. Izrađeni kolektori osnovnog i dodatnog materijala.....	54
Slika 62. Izrada kolektora potrebnog za izmjenu topline.....	55
Slika 63. Kolektori stezanja .....	56
Slika 64. Kolektor izmjene topline.....	57
Slika 65. Odabir početnih i krajnjih točaka trajektorije i referentne linije.....	58
Slika 66. Trajektorija i referentna linija prvog prolaza zavarivanja.....	58
Slika 67. Drugi korak opcije „ <i>Heat Source Advisor</i> “.....	59
Slika 68. „ <i>Weld line</i> “ .....	60
Slika 69. Stupci : a) „ <i>Weld pool</i> “, b) „ <i>Energy</i> “ .....	61
Slika 70. Kalibrirani unos topline četvrtog prolaza.....	62
Slika 71. Uvjeti izmjene topline.....	63
Slika 72. Uvjeti stezanja.....	64
Slika 73. Posljednji korak „ <i>Welding advisor-a</i> “ .....	64
Slika 74. Odabir datoteke s rezultatima .....	65
Slika 75. Završna kalibracija petog prolaza .....	66
Slika 76. Simulirane deformacije spoja 1.....	67
Slika 77. Simulirane deformacije spoja 1 (izometrija).....	68
Slika 78. Simulirane deformacije spoja 2.....	68
Slika 79. Simulirane deformacije spoja 2 (izometrija).....	69

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika S235, S275, S355 [16] .....	25
Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje <i>VPS 4000 digit</i> [19] .....	32
Tablica 3. Kemijski sastav <i>SG2</i> [21] .....	34
Tablica 4. Parametri zavarivanja spoja 1 .....	35
Tablica 5. Kemijski sastav <i>Lincoln MIG 309LSi</i> [22] .....	37
Tablica 6. Parametri zavarivanja spoja 2 .....	38
Tablica 7. Kemijski sastav <i>Megafil – 550R</i> [23] .....	40
Tablica 8. Parametri zavarivanja spoja 3 .....	41
Tablica 9. Vrijednosti deformacija spoja 1 .....	44
Tablica 10. Vrijednosti deformacija spoja 2 .....	45
Tablica 11. Vrijednosti deformacija spoja 3 .....	46

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_5$	%	istežanje
Ar		argon
C		ugljik
$C_{ekv}$		ekvivalent ugljika
$CO_2$		ugljkov dioksid
Cr		krom
EPP		elektrolučno zavarivanje pod praškom
$I$	A	struja zavarivanja
MAG		zavarivanje pod zaštitom plina
Mn		mangan
Mo		molibden
Ni		nikal
P		fosfor
$Q$	kJ/mm	unos topline
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
REL		ručno – elektrolučno zavarivanje
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
S		sumpor
Si		silicij
$t$	s	vrijeme
TIG		elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
$U$	V	napon zavarivanja
$v$	mm/min	brzina zavarivanja
$\alpha$	°	kut deformacije
$\alpha_{A\check{C}}$	$K^{-1}$	koeficijent toplinskog rastezanja austenitnog čelika
$\alpha_{K\check{C}}$	$K^{-1}$	koeficijent toplinskog rastezanja konstrukcijskog čelika

## SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada obrađena je metoda konačnih elemenata koja se koristi kao ishodište aplikacija za simulaciju zavarivanja. Kratko su obrađene različite komercijalne aplikacije za simulaciju zavarivanja. Također, obrađuju se načini odabira dodatnog materijala i postupka zavarivanja. U zadnjem dijelu teoretskog dijela rada, obrađuju se deformacije, njihova podjela te načini sprečavanja njihovog nastanka.

Eksperimentalni dio rada podijeljen je na dva dijela: realno i simulirano zavarivanje. Realni dio zavarivanja proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Zavaren je sučeljeni spoj različitim dodatnim materijalima te je ispitan utjecaj dodatnog materijala na deformacije. Simulacija je provedena na osobnom računalu, u programskom paketu Visual-Environment-u te su dobiveni rezultati uspoređeni s realnim.

Ključne riječi: numeričke simulacije; Visual-Environment; dodatni materijal; deformacije

## SUMMARY

The theoretical part of the graduate thesis deals with the finite element method used as the starting point for the welding simulation application. Various commercial applications for welding simulations were processed. Also, the methods of selecting additional materials and welding procedures are being worked out. In the latter part of the theoretical part of the work, deformations, their division and ways of preventing their occurrence are treated.

The experimental part of the work is divided into two parts: real and simulated welding. The real part of experimental work is carried out in the Laboratory of welding at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Butt welds were welded with variety of additional materials and it was examined the impact of additional material on deformation. Simulation was performed on a computer, in the Visual - Environment program package and results were compared to real.

Key words: numerical simulations; Visual – Environment; filler material; distortions

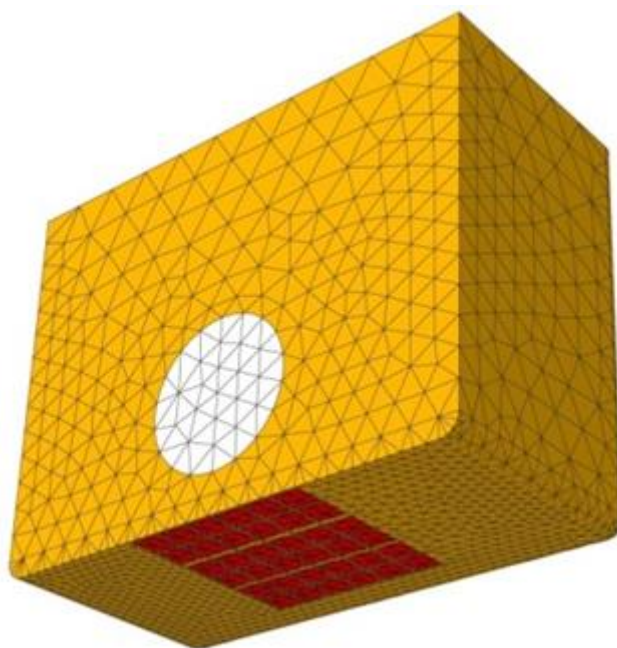
# 1. NUMERIČKE SIMULACIJE U ZAVARIVANJU

## 1.1 Uvod

Zavarivanje kao tehnologija je vrlo složen proces pri kojem se često pojavljuju promjene u materijalu zbog toga jer se prilikom tehnologije zavarivanja unosi toplina. Unosom topline materijal se zagrijava te kasnije hladi. Time dolazi do promjene mikrostrukture materijala u zavarenom spoju i zoni utjecaja topline. Promjena mikrostrukture direktno utječe na promjenu svojstava pa materijal u tom području ima drugačija svojstva, najčešće lošija, u odnosu na osnovni materijal. Različitim aplikacijama za simulaciju zavarivanja pokušava se simulirati proces zavarivanja, tj. promjene koje nastaju u materijalu prilikom i nakon izvođenja samog procesa te promjenom parametara doći do optimalnog rješenja. Takav pristup smanjuje troškove, ali sa uzimanjem rješenja, kao konačnim, treba biti oprezan. Softver ne uzima u obzir sve realne uvjete koji se mogu pojaviti te zbog toga, nakon provođenja simulacije, treba provesti eksperiment da se ispitaju dobivena rješenja.

Provođenje simulacije zavarivanja nije moguće bez metode konačnih elemenata. Za CAD modele dovoljno je definirati samo površine promatranog elementa što za softvere koji simuliraju proces zavarivanja nije dovoljno. Mora se kreirati model koji se sastoji od konačnog broja elemenata. Prilikom simulacije, diferencijalnim jednačbama ili varijacijskom formulom opisuje se stanje u pojedinom elementu i eventualne promjene. Takve jednačbe su vrlo komplicirane te predstavljaju opterećenje za računalni sustav. Zbog toga treba pažljivo odabrati veličinu konačnih elemenata da navedeno rješenje zadovolji, a da vrijeme simulacije bude prihvatljivo. Cilj je pronaći kompromis između tih dviju stavki.

Na slici 1. može se vidjeti tipičan primjer izgleda modela nastalog primjenom metode konačnih elemenata. Konačni elementi su u trodimenzionalnom obliku (piramide).

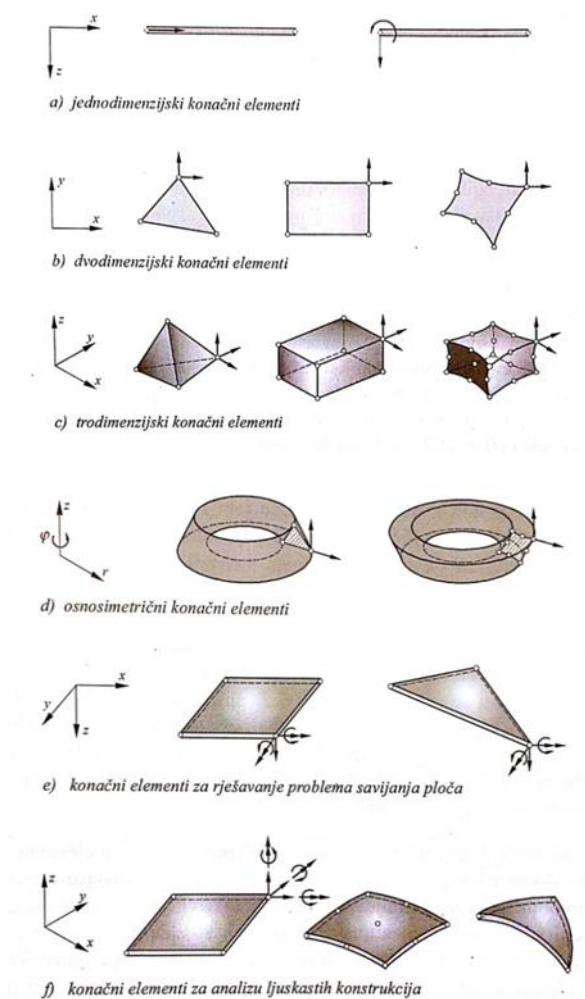


**Slika 1. Izgled modela nastalog metodom konačnih elemenata [1]**

## **1.2 Metoda konačnih elemenata**

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno mnogo stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni element, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja elemenata. Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi polazi se od diferencijalnih jednadžbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija [1].

Konačni elementi mogu biti različitog izgleda te njihov izgled ima utjecaj na rezultate. Na slici 2. vidljivi su tipični korišteni konačni elementi.



Slika 2. Osnovni konačni elementi [2]

### 1.3 Aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja

Pomoću aplikacija za simulaciju zavarivanja moguće je saznati ponašanje materijala prilikom provođenja procesa zavarivanja. To podrazumijeva: temperaturni raspon, udio pojedinih faza, različite deformacije, naprezanja, veličinu kristalnog zrna itd. Ovisno o mogućnostima pojedine aplikacije moguće je provesti više ili manje različitih analiza.

Neke od aplikacija prisutnih na tržištu za simulaciju zavarivanja:

- SORPAS (2D i 3D)
- Simufact.welding
- Sysweld (Visual Environment)
- PAM ASSEMBLY.

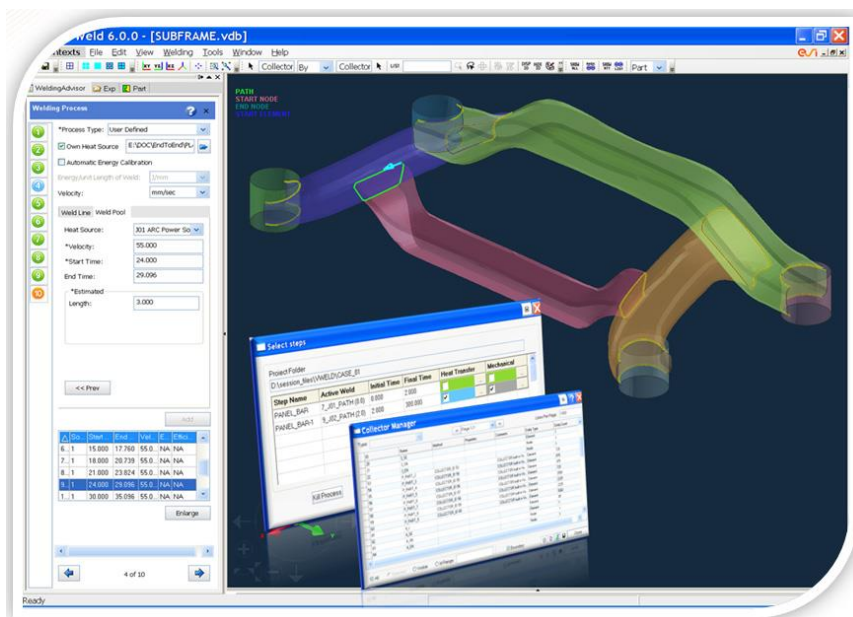


### **1.3.1 Sysweld (Visual Environment)**

Sysweld predstavlja virtualni okoliš u kojem se odvijaju svi izračuni, stvoren je od strane ESI grupe. On je vrlo kompleksan te je, za komercijalnu upotrebu, razvijeno sučelje Visual Environment. Ono je prihvatljivije za upotrebu te služi kao poveznica sa Sysweld-om koji i dalje izvršava sve izračune. Na taj način moguće je provesti simulacije ponašanja pojedinog proizvoda u različitim radnim okruženjima. Što se tiče zavarivanja, Visual – Environment sadrži posebnu aplikaciju Visual Weld (slika 3.). U njoj je moguće provesti simulaciju zavarivanja modela kreiranog u Visual – Mesh-u s ciljem otkrivanja promjena u materijalu bez izvođenja eksperimenta. Nakon provođenja simulacije, rezultati se očitavaju pomoću drugog modula, Visual – Viewer. Na taj način moguće je dobiti raspored tvrdoća, udio faza za bilo koji dio materijala, deformacije te različita naprezanja nastala procesom zavarivanja. Metoda kojom se postižu navedeni rezultati je „Step by Step Simulation“. Simulacija u modulu Visual – Weld, daje dvije vrste analize, toplinsko - metaluršku i mehaničku te mogućnost provjere tvrdoće. Termo – metalurška analiza daje podatke vezane uz temperaturne raspone tijekom procesa i promjenu faza tijekom, odnosno nakon procesa zavarivanja. U podacima nastalim mehaničkom analizom moguće je provjeriti nastale deformacije te različite vrste naprezanja (ekvivalentna naprezanja pomoću Von Mises formule, srednje vrijednosti naprezanja, itd.). Ako se konstrukcija sastoji od više zavora ili od jednog zavora od više prolaza, moguće je provesti analizu nakon svakog pojedinog prolaza što omogućava detaljan uvid u proces. Također, moguća je provjera tvrdoće materijala nakon zavarivanja, ali ta opcija se može provesti samo za nelegirane i niskolegirane čelike.

Zahvaljući tome reducirana je trošak izrade prototipova i vjerojatnost pojave problema uslijed djelovanja prevelikih deformacija. Lako se kontroliraju naprezanja u zavarenim konstrukcijama i kvaliteta zavora, vrlo brzo se razvije i optimizira plan zavarivanja [5].

Osim što je u aplikaciji moguće provesti simulaciju zavarivanja, moguće je i provesti simulaciju toplinske obrade. Proces toplinske obrade vrlo je sličan procesu zavarivanja, promjene u materijalu su gotovo identične.



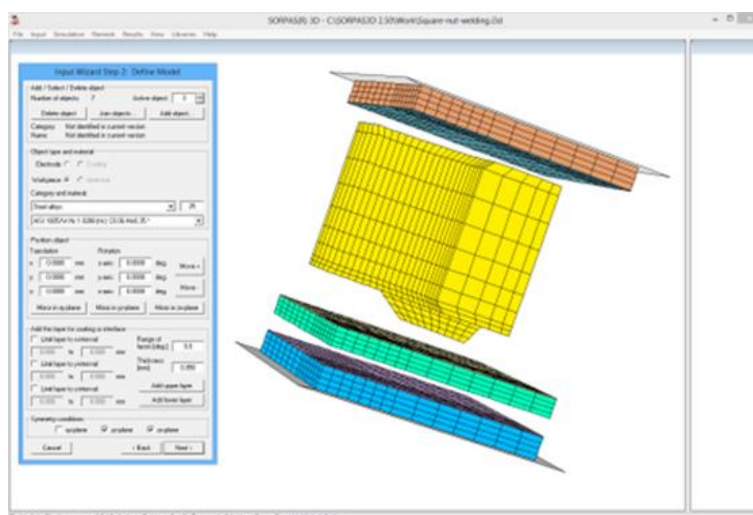
Slika 3. Grafičko korisničko sučelje Visual Weld - a [5]

### 1.3.2 Ostale aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja

#### 1.3.2.1 SORPAS

SORPAS aplikacija služi za simulaciju i optimizaciju elektrootpornog zavarivanja. Lako se koristi te nisu potrebna znanja o numeričkim simulacijama kao kod drugih aplikacija za numeričku simulaciju. Može se koristiti u simulaciji zavarivanja svih vrsta čelika, aluminijskih legura, legura titana, legura bakra, legura baziranih na niklu, čistih metala itd. U aplikaciji je moguće, za pojedini proces, izračunati raspodjelu struje i topline s obzirom na tip struje za zavarivanje i materijala, izračunati prijenos topline, promjenu svojstva materijala ovisno o temperaturi, vidjeti nastale deformacije, optimizirati struju zavarivanja itd. U 3D verziji rezultati su pregledniji te je grafičko sučelje lakše za upotrebu (slika 4.).

SORPAS dolazi u tri standardna paketa: SORPAS Standard, SORPAS Professional, SORPAS Enterprise. Svaki od paketa ima u sebi uključene različite module, a time je i njihova cijena različita.



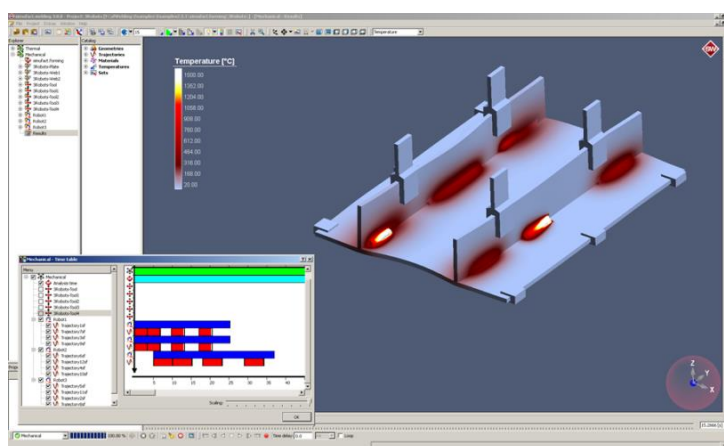
Slika 4. Grafičko korisničko sučelje SORPAS -a [3]

### 1.3.2.2 Simufact.welding

Simufact.welding nudi mogućnost izračuna naprezanja nastalih zavarivanjem, deformacije i promjenu svojstava materijala pomoću grafičkog sučelja [4].

Na taj način vrlo lako se mogu otkriti kritične deformacije, optimizirati proces zavarivanja, alate za stezanje, a time i sam proizvod. Također, može se vidjeti ponašanje materijala tijekom zavarivanja, razvoj zone utjecaja topline, nastanak zaostalih naprezanja te raspored temperature tijekom procesa (slika 5.).

Najvažniji cilj izračuna u Simufact.welding – u je predvidjeti deformacije nastale zavarivanjem [4].



Slika 5. Grafičko korisničko sučelje Simufact.welding – a [4]

## 2. DEFORMACIJE

Utjecaj topline kod zavarivanja, osim s metalurškog stajališta, stvara tehnologu niz posebnih tehnoloških problema. Tri su osnovna područja tih problema: stezanje (skraćivanje), deformacije i zaostala naprezanja. Sva tri područja međusobno su povezana [6].

Tijekom zavarivanja utjecaj topline prouzrokuje rastezanje. Tijekom hlađenja, nakon zavarivanja, dolazi do ponovnog stezanja radnog komada. Te promjene zbivaju se u jednoj bližoj, ograničenoj zoni uz zavareni spoj i u njemu samom. Ostale hladne zone materijala, odnosno radnog komada, opiru se rastezanju i tako tlače zagrijanu zonu i uneseni materijal zavara. To tlačenje je djelomično veće od granice elastičnosti materijala te tako nastaje zbijanje zagrijanog dijela materijala zavara i zone uz zavar. Kod hlađenja zagrijani materijal nastoji se vratiti na prvobitnu dužinu, međutim, s obzirom da je došlo do zbijanja, a s tim i do skraćivanja utjecajne zone, pojavljuju se vlačne, a istodobno i tlačne sile koje nastoje vratiti materijal u prvobitno stanje. Te sile uzrokuju zaostala naprezanja. Takova naprezanja postoje u svakom zavarenom spoju, samo su različitih veličina [6].

Zonska stezanja u jednoj konstrukciji uzrokuju, osim zaostalih naprezanja, i deformacije. Čim su deformacije veće, naprezanja su niža i obrnuto (slika 6. i slika 7.) [6].



**Slika 6. Sučeljeni „V“ zavar 1 [7]**

- ne pokazuje deformacije, ali sadržava visoka zaostala naprezanja



**Slika 7. Sučeljeni „V“ zavar 2 [7]**

- pokazuje ekstremne deformacije, ali sadržana zaostala naprezanja možda su niska

Zaostala naprezanja i deformacije uvjetovani su fizičkim svojstvima osnovnog materijala, postupku zavarivanja te tehnikom zavarivača [7].

## **2.1 Fizička svojstva materijala i deformacije**

Kao što je prethodno navedeno, deformacije su rezultat zagrijavanja i ohlađivanja.

Promjena temperature mijenja fizička svojstva metala, a te promjene imaju direktan utjecaj na deformacije. Kad se, tijekom zavarivanja, temperatura metala poveća, fizička svojstva metala se promijene na sljedeći način [7]:

- granica razvlačenja se snizi
- modul elastičnosti se smanji
- koeficijent toplinskog rastezanja se poveća
- toplinska vodljivost se smanji
- toplinski kapacitet se poveća.

Različita fizička svojstva različitih metala utječu na količinu deformacije i zaostalih naprezanja koja se mogu očekivati u zavarenom spoju [7].

### **2.1.1 Granica razvlačenja**

Granica razvlačenja čelika je na onoj točki u kojoj se čelik rasteže i produžuje iako se opterećenje ne povećava. Viša granica razvlačenja zavarivača i osnovnog materijala uz zavar, znači da su potrebna veća zaostala naprezanja da se radni komad deformira [7].

### **2.1.2 Koeficijent toplinskog rastezanja**

Koeficijent toplinskog rastezanja je količina proširenja metala prilikom zagrijavanja te količina skupljanja metala prilikom hlađenja. Ako se duljina metala koje zavarujemo ne promijeni prilikom zavarivanja, skraćivanje i deformacije se ne bi pojavljivale. Visoki koeficijenti toplinskog rastezanja materijala teže većem skraćivanju dodatnog materijala u zavaru i osnovnom materijala uz zavar što povećava vjerojatnost pojave deformacija [7].

### **2.1.3 Toplinska vodljivost**

Toplinska vodljivost mjera je širenja topline kroz metal. Metali niske toplinske vodljivosti usporavaju širenje topline od zavara stvarajući koncentraciju topline u zoni zavara. Zbog toga, povećan je iznos skraćivanja zavara i osnovnog materijala uz zavar [7].

## 2.2 Vrste deformacija

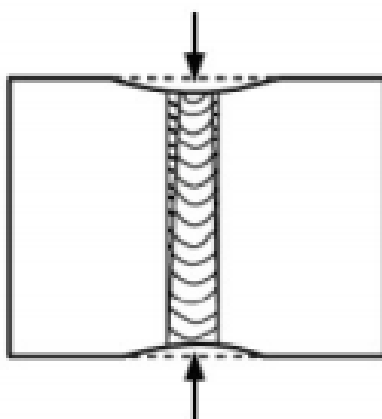
Osnovne vrste deformacija su: longitudinalna kontrakcija, savijanje, poprečna kontrakcija, rotacijska deformacija, iskrivljenje te kutna deformacija. U sljedećem tekstu objašnjena je svaka vrsta zasebno.

### 2.2.1 Longitudinalna (uzdužna) kontrakcija i savijanje

Ukoliko se materijal zavora nanosi po dužini uzduž čelične ploče koja nije stegnuta, ploča će odmaknuti na svakom kraju prilikom hlađenja zavora (slika 8.). To se događa zbog kontrakcije metala zavora iznad površine ploče (slika 9.). Ako je depozit materijala nakon jednog prolaza malen ili ima visoku penetraciju i ravnog izgleda je, nastale deformacije su manje nego one kod konveksnog oblika depozita [7].



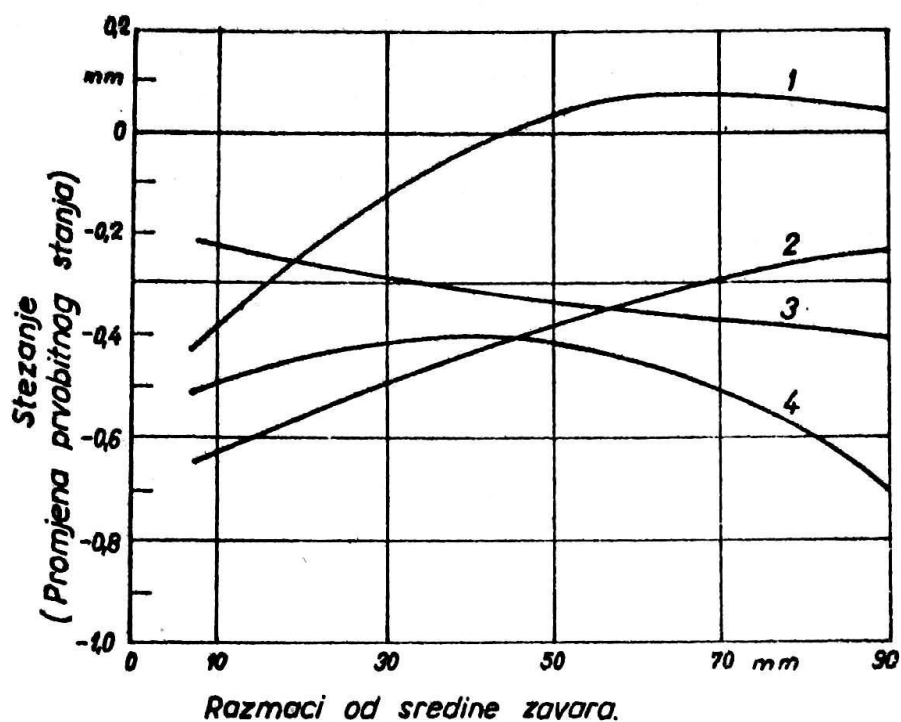
Slika 8. Shematski prikaz savijanja [7]



Slika 9. Shematski prikaz longitudinalne kontrakcije [8]

Ukoliko je moguće izvesti postupak zavarivanja tako da se žica drži na obje strane ploče približno jednako, pojaviti će se vrlo male deformacije. Također, zavarivanjem sa suprotnih strana ploča, moguće je ploču povratiti u njen prvobitan oblik [7].

Velik utjecaj na pojavu deformacija, a time i longitudinalnih, ima odabrani postupak zavarivanja te redoslijed zavarivanja. Slika 10. pokazuje dijagram ovisnosti postupka zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu uzdužnog stezanja. Iz dijagrama vidljivo je da MAG zavarivanjem postizemo puno manje deformacije u odnosu na REL i EPP zavarivanje. Slično zaključujemo i na slici 11. Odabirom lasera (slika 11. a) kao postupka zavarivanja u odnosu na TIG postupak (slika 11. b), nastale deformacije puno su manje. Slika 12. prikazuje ovisnost veličine uzdužnog stezanja o redoslijedu zavarivanja. Najveće deformacije se ostvaruju prilikom zavarivanja u jednom smjeru (krivulja 3). Ukoliko se deformacije žele smanjiti treba težiti navedenim tehnikama.

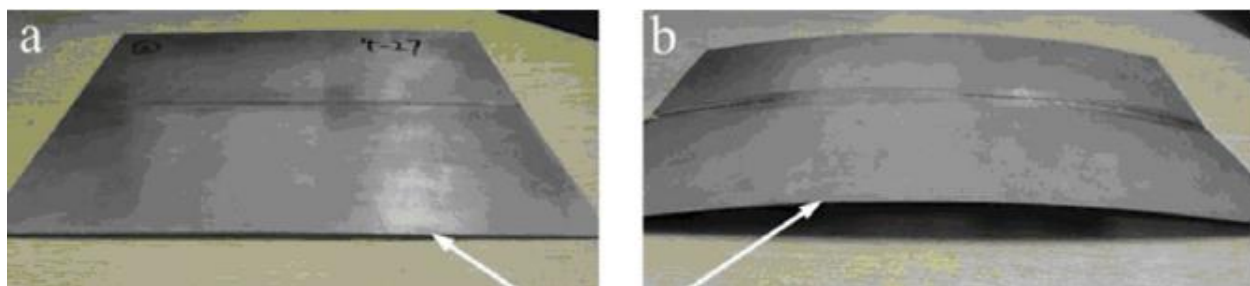


Slika 10. Utjecaj postupka zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu uzdužne deformacije [6]

(ploča lima 300 x 90 mm, zavarena u dva prolaza)

1 – MAG zavarivanje (CO<sub>2</sub> zaštitni plin), 2 – REL zavarivanje bazičnom elektrodom

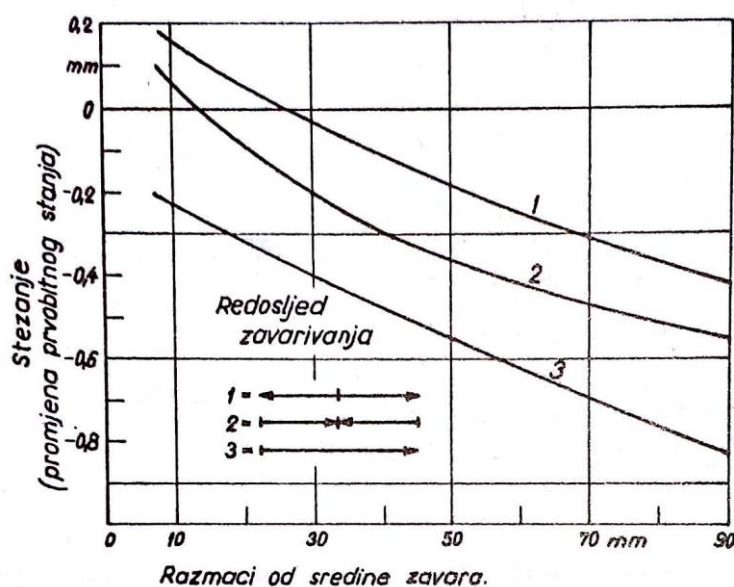
3 – EPP zavarivanje, 4 – REL zavarivanje kiselom elektrodom



Slika 11. Savijanje [9]:

a) lasersko zavarivanje

b) TIG zavarivanje



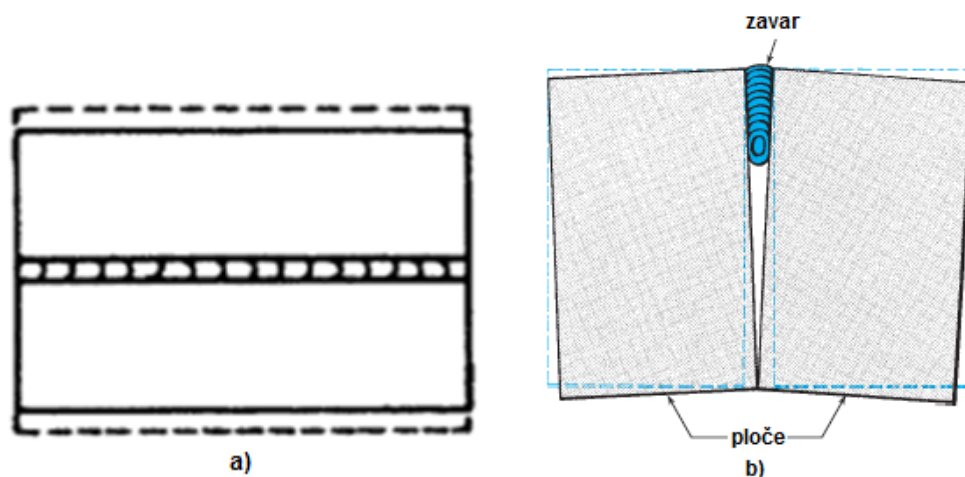
Slika 12. Utjecaj redoslijeda zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu uzdužne deformacije [6]

(ploča lima 300 x 90 mm, zavarjena u dva prolaza)

### 2.2.2 Poprečna kontrakcija i rotacijska deformacija

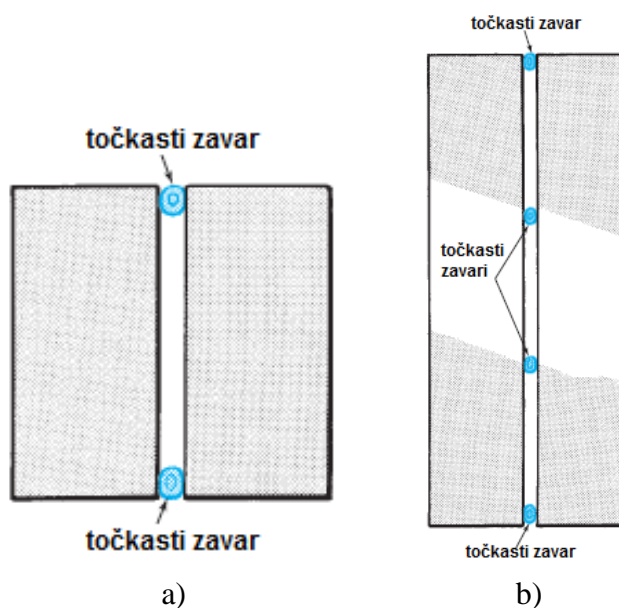
Ako se dvije ploče zavaruju u sučeljenom spoju i slobodno se mogu gibati tijekom zavarivanja, one će se povući jedna prema drugoj na kraju zvara zbog kontrakcije metala zvara prilikom hlađenja. Takav proces naziva se poprečna kontrakcija (slika 13. a) ili rotacijska deformacija (slika 13. b) zvara ovisno o pupunjenosti spoja dodatnim materijalom. Lako se može kontrolirati [7].





**Slika 13. Poprečna kontrakcija (a) i rotacijska deformacija (b) sučeljenog spoja [10, 7]**

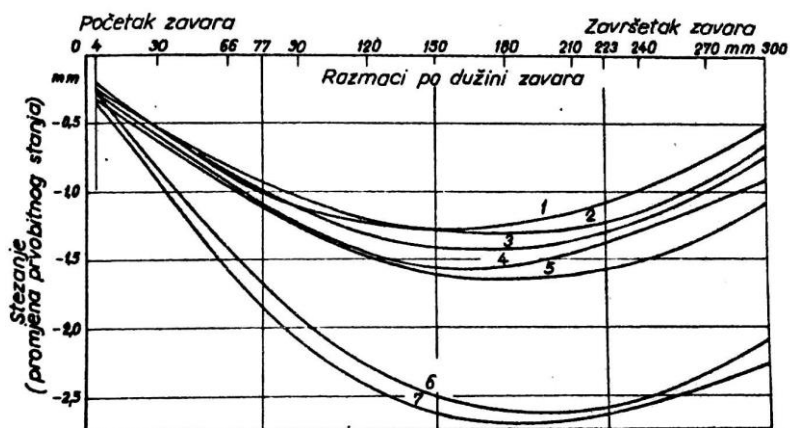
Ako je spoj koji se zavaruje kratak (maksimalno 25 cm), on se može točkasto zavariti na oba kraja (slika 14. a) i na taj način onemogućiti poprečnu deformaciju. Ako je zavar dulji (slika 14. b), potrebno ga je na više mjesta točkasto zavariti. Frekvencija i veličina točkastih zavara ovisi o debljini ploča, vrsti materijala i vrsti pripreme spoja [7].



**Slika 14. Sprječavanje poprečne deformacije [7]**

Također, poprečne deformacije moguće je spriječiti stezanjem radnih komada ili linearnom promjenom razmaka između ploča duž zavara.

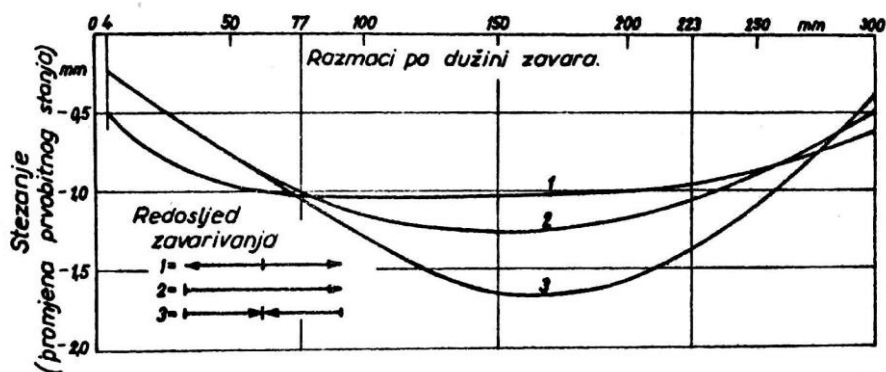
Kod poprečne deformacije, također, utjecaj ima vrsta postupka te redoslijed zavarivanja. MAG postupkom zavarivanja i zavarivanjem od sredine zavara prema krajevima, postižu se najmanji iznosi poprečnih deformacija (slika 15. i slika 16.)



Slika 15. Utjecaj postupka zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu poprečne deformacije [6]

(ploča lima 300 x 90 mm, zavarena u dva prolaza)

- 1 – REL zavarivanje debelo obloženom titanskom elektrodom, 2 – MAG zavarivanje,  
 3 – EPP zavarivanje, 4 – REL zavarivanje bazičnom elektrodom,  
 5 – REL zavarivanje kiselom elektrodom, 6 i 7 – plinsko zavarivanje



Slika 16. Utjecaj redoslijeda zavarivanja konstrukcijskog čelika na veličinu poprečne deformacije [6]

(ploča lima 300 x 90 mm, zavarena u dva prolaza)

### 2.2.3 Iskrivljenje

U zavarivanju skošenih rubova debljih ploča, kao što su jednostrani „V“ i „U“ sučeljeni spojevi, ploče će se kutno povući jedna prema drugoj (slika 17. i slika 18.). To se događa jer je otvor žlijeba na površini veći nego na dnu što tamo rezultira s više depozita materijala, a time i većom kontrakcijom jer se većina zavora nalazi iznad neutralne osi [7].

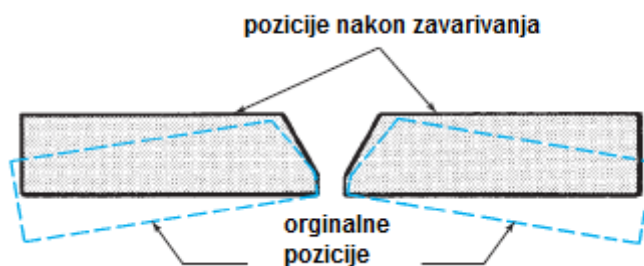


Slika 17. Shematski prikaz iskrivljenja [8]



Slika 18. Realni primjer iskrivljenja [11]

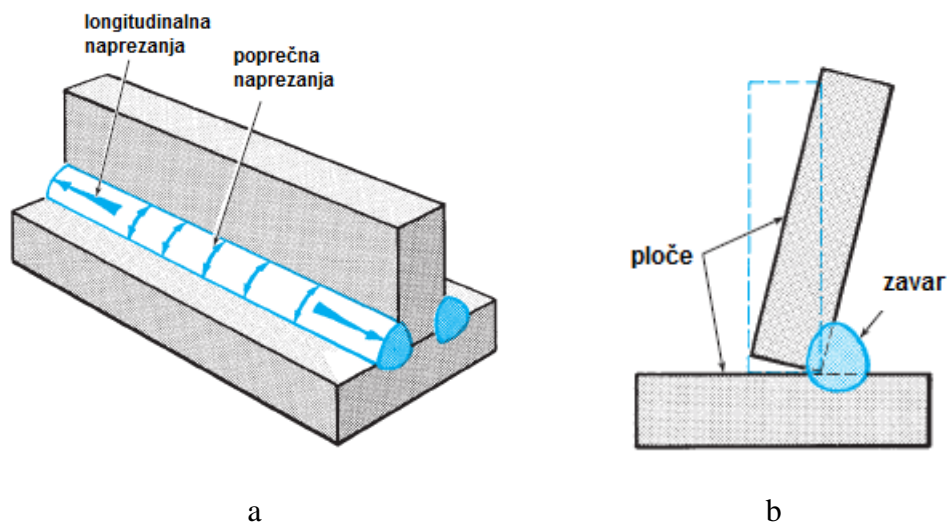
Veći broj prolaza znači i veće iskrivljenje. Iskrivljenje se može spriječiti deformacijom prije zavarivanja, koja je orijentirana suprotno od iskrivljenja (slika 19.). Ukoliko taj proces nije moguće ostvariti, koriste se različiti načini stezanja. No stezanjem radnih komada zaostala naprezanja nakon zavarivanja, rastu [7].



Slika 19. Metoda sprječavanja iskrivljenja [7]

### 2.2.4 Kutna deformacija

Kod zavarivanja kutnih spojeva pojavljuju se i longitudinalna i poprečna naprezanja (slika 19. a). Kad se kutni zavar koristi u T – spoju, on će povući vertikalni dio spoja prema strani s koje se zavaruje (slika 19. b). Također, taj dio će se i saviti uslijed longitudinalnog naprezanja [7].



Slika 20. Naprezanja i deformacije kutnog spoja [7]

### 2.3 Smanjivanje iznosa deformacija

Zbog zahtjeva na točnost, vizualni izgled te ostalih sličnih zahtjeva, deformacije je nužno kontrolirati te minimizirati njihov iznos. Deformacije je moguće spriječiti djelovanjem na radne komade prije zavarivanja, tijekom zavarivanja ili naknadnom obradom nakon zavarivanja.

#### 2.3.1 Prevencija deformacija prije zavarivanja

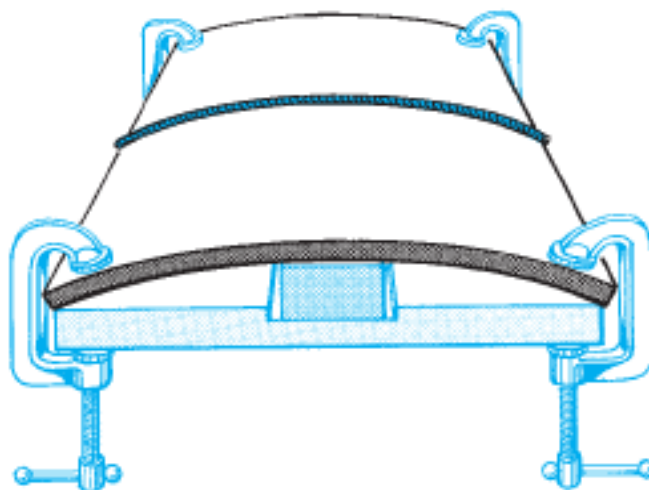
Nastalne deformacije nakon zavarivanja moguće je spriječiti prije samog procesa:

- djelovanjem na konstrukciju (pripremu) spoja
- odabirom povoljnijeg postupka i parametara zavarivanja
- preddeformacijom komada
- posebnim namještanjem radnih komada
- stezanjem komada.

Spojevi se trebaju konstruirati tako da je potrebna minimalna količina dodatnog materijala te moraju biti postavljeni na način da se balansiraju međusobno s ciljem izbjegavanja lokalnih zona ekstenzivnog skupljanja. Npr. kod zavarivanja debljih materijala povoljnije je koristiti „X“ spoj nego jednostruki „V“ spoj [7].

Također, materijale koje je moguće predgrijati, treba predgrijati jer, obično, veće temperature predgrijavanja znače i manje deformacije. Preporuke za određivanje temperature predgrijavanja feritnih čelika moguće je pronaći u normi HRN EN 1011 – 2.

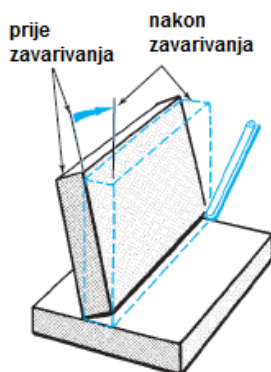
Sile stezanja se mogu iskoristiti na način da se ponište prethodnom deformacijom kao što to prikazuje slika 21. Ploče se savijaju u smjeru suprotnom od strane zavarivanja. Skupljanje metala zavora tijekom zavarivanja suzdržano je stezaljkama. Nakon hlađenja, stezaljke se uklone te se ploče povrate natrag te se na taj način poravnaju [7].



**Slika 21. Radni komadi su prethodno deformirani i stegnuti [7]**

Još jedna metoda sprečavanja neželjenih deformacija prije zavarivanja je posebno namještanje radnih komada (slika 22.). Vertikalna ploča spoja se zamakne te nakon što se zavar skupi, on povlači ploču u ispravan položaj [7].

Problem kod ove metode je odabir kuta vertikalne ploče da se, nakon zavarivanja, ona zamakne u točan položaj.

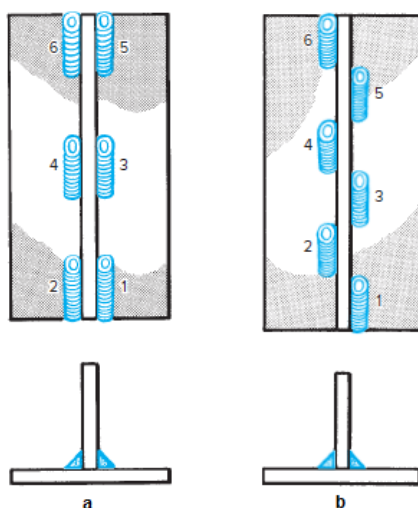


Slika 22. Sprečavanje neželjenih deformacija namještanjem radnih komada [7]

### 2.3.2 Smanjivanje deformacija prilikom zavarivanja

Deformacije se mogu smanjiti korištenjem nizanog zavarivanja poznatim pod nazivom „lutanje“ (*engl. wandering*) kojim se omogućuje stvaranje zavora na različitim točkama spoja. Skupljanje koje se javlja na jednom zavaru suprotstavlja se skupljanju koje se javlja na drugom. To se omogućuje provedbom metode lančanih intermitirajućih kutnih zavora (*engl. chain intermittent fillet welds*) ili metodom raspoređenih intermitirajućih (prekidnih) kutnih zavora (*engl. staggered intermittent fillet welds*) [7].

Slika 23. prikazuje shemu obje metode. Ukoliko se zahtijeva da spoj bude kontinuiran, preostali prostor popunjava se na isti princip, ovisno o vrsti metode.

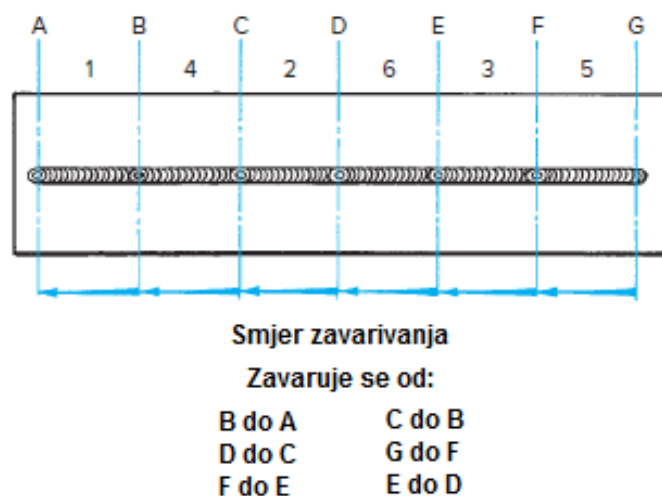


Slika 23. Metode zavarivanja „lutanjem“ [7]:

a) raspoređeni intermitirajući kutni zavori,

b) lančani intermitirajući kutni zavori

Drugi način minimizacije deformacija mogući je preko na preskok metode ili metode povratnog koraka te kombinacijom navedenih. Slika 24. prikazuje kombinaciju na preskok metode i metode povratnog koraka. Smjer zavarivanja identičan je onome koji se primjenjuje u metodi povratnog koraka uz iznimku da se kratki zavari ne stvaraju u kontinuiranom slijedu. Jedan zavar nanosi se na početku spoja, preskače se jedna sekcija te se drugi zavar nanosi blizu centra. Nakon toga, treći zavar nanosi se poslije sljedeće praznine. Po završetku spoja, vraća se na početak te se sličnim principom popunjavaju praznine [7].



**Slika 24. Kombinacija na preskok i metode povratnog koraka [7]**

Ukoliko je moguće zavarivati istovremeno sa suprotnih strana strukture, u materijal se unose balansirana naprezanja te je pojava deformacija minimizirana. Takva metoda zavarivanja naziva se uravnotežen slijed zavarivanja (*engl. balanced welding sequence*).

### 2.3.3 Otklanjanje deformacija nakon zavarivanja

Ukoliko se u strukturi, nakon zavarivanja, pojavilo iskrivljenje, moguće je upotrijebiti sljedeće korektivne mjere [7]:

- metodu deformacije (*engl. shrinkage*)
- metodu deformacijskog zavarivanja (*engl. shrink welding*)
- metodu dodavanja ukruta (*engl. added stiffening*).

Metoda deformiranja se sastoji od izmjeničnog zagrijavanja i hlađenja, često praćeno čekićanjem ili mehaničkim radom [7].

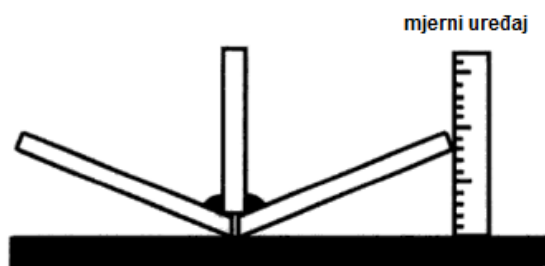
Metoda deformacijskog zavarivanja varijacija je metode deformiranja u kojoj se toplina unosi kretajućim električnim lukom dodatnog materijala na konveksnoj strani deformacije. Hlađenjem, kombinacijom skupljanja osnovnog i dodatnog materijala deformacija se uklanja. Dodani zavari se mogu skinuti ukoliko se zahtijeva glatka površina [7].

Dodavanjem ukruta tehnika je koja se može koristiti samo na pločama. Sastoji se od povlačenja ploče u liniju sa snažnim naslonima i dodatnim zavarivačkim ukrutama na pločama kako bi ploča opet poprimila početnu ravninu [7].

## 2.4 Tehnike mjerenja deformacija

Nakon provedenog procesa zavarivanja nastale deformacije potrebno je izmjeriti s ciljem uspoređivanja rezultata te uočavanja utjecaja pojedinih parametara na njihov iznos. Tehnike mjerenja, najčešće, vrlo su jednostavne te uključuju alate za mjerenje kuteva, duljine i slično.

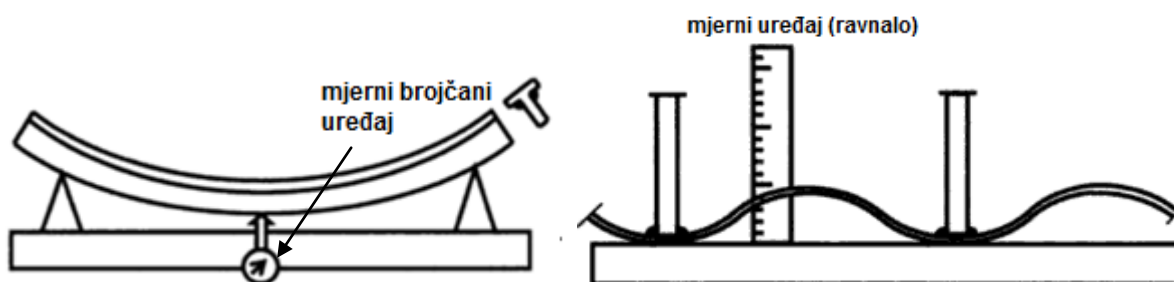
U principu, bilo koji instrument za mjerenje dimenzija može se koristiti za mjerenje deformacija nastalih nakon zavarivanja i ohlađivanja spoja. Na primjer, kao što prikazuje slika 25., kutna deformacija T – spoja lako se može izmjeriti ravnom pri čemu je spoj pozicioniran na ravnoj referentnoj ravnini [10].



Slika 25. Mjerenje kutne deformacije [10]

Na slici 26. a) prikazan je postupak mjerenja savijanja kontuniranim pomakom ticala po zavaru pomoću mehaničkog brojčanog uređaja. Također se ravnalo ili pomično mjerilo mogu iskoristiti za mjerenje kontunirane kutne deformacije panela zavarenog s ukrutama (slika 26. b) [10].



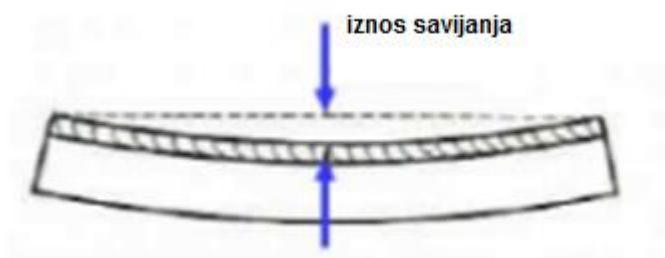


**Slika 26. Postupak mjerenja kutne deformacije: [10]**

**a) pomoću mehaničkog brojanog uređaja**

**b) pomoću ravnala**

Postupak mjerenja savijanja vrlo je jednostavan. Nakon provedenog postupka zavarivanja, ploča se postavlja na ravnu površinu. Otklon se lako izmjeri pomoću ravnala ili pomičnog mjerila (slika 27.). Na sličan način mjeri se i uzdužna deformacija.



**Slika 27. Mjerenje savijanja [12]**

Problem navedenih tehnika mjerenja deformacija jest dobivanje vrijednosti deformacije u odnosu na referentnu ravninu. Deformacija strukture nakon zavarivanja razlika je početnog oblika (prije zavarivanja) i konačnog oblika (nakon zavarivanja). Početni oblik strukture ne mora biti ravan. Zbog toga, odabir referentne ravnine treba pažljivo provesti prije provođenja samog mjerenja [10].

### 3. ODABIR POSTUPKA ZAVARIVANJA

Odabir postupka zavarivanja najvažniji je proces kod projektiranja tehnologije zavarivanja. Pravilnim odabirom postupka ekonomičnije se dobiva zadana kvaliteta i svojstva spoja čime se postižu prijeko potrebne uštede. Ne postoji univerzalna formula ili izraz za odabir postupka već odabir ovisi o nekoliko faktora.

Postoje različiti kriteriji za izbor postupka zavarivanja. Neki od njih su [13]:

- debljina osnovnog materijala koji se zavaruje
- oblik spoja za zavarivanje
- položaj zavarivanja
- potrebna količina depozita
- vrsta/vrste osnovnog materijala
- zahtjevi za kvalitetu zavarenih spojeva
- veličina serije i mjesto zavarivanje.

Debljina materijala ima veliki utjecaj na odabir postupka zavarivanja. Ovisno o debljini osnovnog materijala neke od postupka moguće je primjeniti, dok ostale, ili nije moguće, ili ih je neekonomično primjeniti. Na primjer kod zavarivanja sučeljenog spoja lima tanjih debljina moguće je primjeniti MAG, TIG ili REL postupak zavarivanja dok nije moguće primjeniti EPP postupak zavarivanja. Kod većih debljina teži se upotrebi EPP ili MAG postupka zbog ekonomičnosti.

Oblik spoja značajno utječe na odabir postupka zavarivanja jer o njemu ovisi masa utrošenog dodatnog materijala, a veća masa uzrokuje [13]:

- veću količinu dodatnog materijala
- više vremena za zavarivanja
- više potrebne energije
- veće troškove stroja.

Položaj zavarivanja vrlo je važan kriterij kod izbora postupka zavarivanja. Iako je horizontalni (položeni) položaj zavarivanja najpoželjniji u odnosu na ostale položaje zavarivanja (nadglavni, zidni, vertikalni), često se puta iz određenih razloga ne izvodi zavarivanje u horizontalnom položaju [13].

Sve postupke zavarivanja nije moguće upotrijebiti u svim položajima. Zbog toga, položaj zavarivanja ima visok utjecaj na odabir postupka zavarivanja.

Već u fazi izbora položaja zavarivanja i oblika žlijeba za zavarivanje orijentacijski su određeni i mogući postupci zavarivanja koji dolaze u obzir kao moguće varijante. Izbor parametara zavarivanja kod određenog postupka zavarivanja je vrlo važna aktivnost i zahtjeva određena specijalistička znanja iz područja zavarivanja [13].

Jedan od kriterija pri izboru postupka zavarivanja može biti i potrebna količina depozita u jedinici vremena, kako bi se zavarena konstrukcija izradila u predviđenim rokovima. No, to svakako ne može biti jedini kriterij, već se veže s ostalim kriterijima (npr. minimalno zahtijevana kvaliteta zavarenih spojeva, mogućnost zavarivanja s obzirom na položaj zavarivanja i ostale uvjete zavarivanja i drugi kriteriji). Uvažavajući kriterij potrebne količine depozita u jedinici vremena kao jedan od značajniji, uz već spomenute druge kriterije, izbor mogućeg postupka zavarivanja ograničava se na jedan do nekoliko postupaka zavarivanja [13].

Vrsta/vrste osnovnog materijala kao kriterij kod tehnološkog izbora postupka zavarivanja obično se veže uz zahtijevanu kvalitetu zavarenih spojeva. Ako se zahtjeva viša razina kvalitete zavarenih spojeva, tada se primjenjuju postupci zavarivanja ili kombinacija postupaka zavarivanja koja rezultira višu kvalitetu zavarenih spojeva [13].

Zahtjev za kvalitetu zavarenih spojeva kao kriterij kod izbora postupka zavarivanja je jedan od najvažnijih kriterija pri izboru postupka zavarivanja sa stajališta tehnološkosti izrade zavarene konstrukcije. Viša razina kvalitete zavarenih spojeva zahtjeva “skuplje” postupke zavarivanja, što uvjetuje veće troškove proizvodnje i višu cijenu zavarene konstrukcije. Tehnološki je postupak zavarivanja ako se postigla barem minimalno zahtijevana kvaliteta zavarenih spojeva (minimalno zahtijevana pouzdanost zavarenih spojeva), uz udovoljenje zahtjeva funkcionalnosti, minimalan utrošak materijala i energije, najmanje zagađivanje čovjekove okoline, te kroz proizvodni proces ostvareni što veću ekonomsku dobit.

Iako je ekonomska dobit kod velikog broja proizvođača na prvom mjestu, zahtjevi za minimalan utrošak materijala i energije, te najmanje zagađivanje čovjekove okoline sve više dobivaju na značenju jer su nužni za opstanak čovjeka (tako se kod nekih zavarenih konstrukcija životni ciklus ne završava krajem eksploatacijskog vijeka, već postoji i recikliranje ili zbrinjavanje proizvoda nakon eksploatacije).

## 4. KONSTRUKCIJSKI ČELIK

Kao što i sam naziv govori, ovi se čelici primjenjuju za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcije itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, poklopci, kućišta, ventili i ostali slični elementi [14].

Na temelju mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva [14]:

- Mehanička svojstva: visoka granica razvlačenja povezana s dovoljnom plastičnom deformabilnošću – istezljivošću. Poželjno je da površina ispod dijagrama "sila - produljenje" bude što veća radi sigurnosti od pojave krhkog loma. Dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama – ovisno o visini temperature i opterećenja. Dovoljni udarni rad loma i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama. Otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja – dovoljna dinamička izdržljivost.
- Otpornost na trošenje: što manji gubitak mase.
- Otpornost na koroziju: npr. korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova.
- Tehnološka svojstva: rezljivost (obradljivost odvajanjem čestica), zavarljivost, hladna oblikovljivost.

Od svih čelika najzastupljeniji su u proizvodnji (65-80% mase) pa i u primjeni za niz nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase kao što su npr. mostovi, dizalice, nosači, brodske konstrukcije, dijelovi vozila, oprema u industriji nafte i plina, a i neki i za tipične strojne elemente. Od tih se čelika u primjeni traži dovoljna nosivost i sigurnost što se želi ostvariti dovoljnom granicom razvlačenja, vlačnom čvrstoćom, tlačnom čvrstoćom, smičnom čvrstoćom, udarni rad loma – naročito pri nižim okolišnim temperaturama [14].

#### 4.1 Zavarljivost feritnih čelika

Od tehnoloških zahtjeva, najvažnija je zavarljivost. Preduvjet za određivanje zavarljivosti feritnih čelika je  $C_{ekv}$ . Vrijednost  $C_{ekv}$  može se izračunati prema različitim izrazima, no najpoznatije su dvije metode iz norme HRN EN 1011 – 2.

Metoda A koristi se za izračunavanje  $C_{ekv}$  nelegiranih, niskolegiranih i sitnozrnatih čelika i glasi:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \text{ u \%} \quad (1) [15]$$

Metoda B, također, koristi se za izračunavanje  $C_{ekv}$  – a nelegiranih, niskolegiranih i sitnozrnatih čelika te glasi:

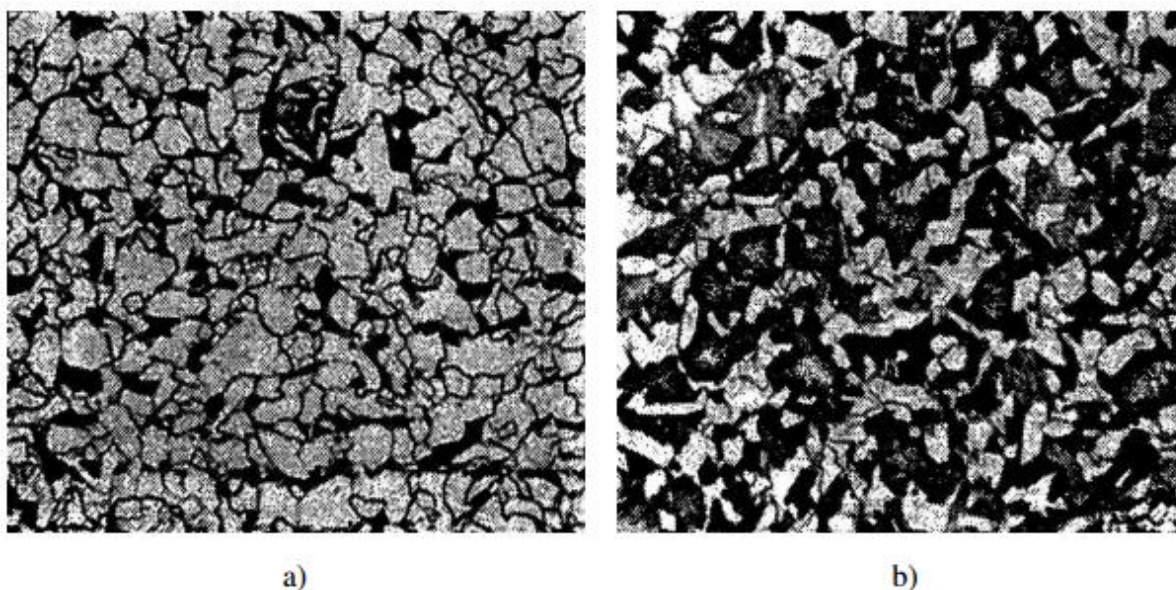
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ u \%} \quad (2) [15]$$

Razlika pojedinih metoda je u izrazu prema kojim se izračunava  $C_{ekv}$  te u području primjene: metoda A se može koristiti za čelike čiji udio ugljika je u rasponu od 0,05 do 0,25 % dok metodom B može se izračunati  $C_{ekv}$  za čelike s većim udjelom ugljika, do 0,32 %.

Osim za definiranje zavarljivosti,  $C_{ekv}$  nam služi i za izračunavanje temperature predgrijavanja. Uz  $C_{ekv}$  potrebno je znati debljinu materijala koji se zavaruje, dodatni materijal pomoću kojeg se određuje unos vodika te sam unos topline. Pravilnim izborom temperature predgrijavanja izbjegava se nastajanje pukotina te nastanak krhke strukture u području zavarenog spoja. Izrazi i metode računanja temperature predgrijavanja dani su u prethodno navedenoj normi, HRN EN 1011 – 2.

#### 4.2 Mikrostruktura i mehanička svojstva konstrukcijskih čelika

Nelegirani čelici imaju feritno - perlitnu mikrostrukturu (slika 28.). Zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja ili zavarivanja normaliziran. Sitnozrnatost se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji stvara aluminijev nitrid i sprječava rast zrna pri kasnijim ugrijavanjima [14].



**Slika 28. Tipična feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika [14]**

a) čelik s 0,1% C

b) čelik s 0,25% C

Kemijski sastav ovakvih čelika nije striktno određen, samo su definirane maksimalne vrijednosti pojedinih legiranih elemenata u čeliku. Tablica 1. prikazuje maksimalne dopuštene vrijednosti legiranih elemenata u tri vrste konstrukcijskih čelika.

**Tablica 1. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika S235, S275, S355 [16]**

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="transform: rotate(-45deg); transform-origin: center;"> <b>Maseni udio, %</b> </div> <div style="margin-left: 10px;"> <b>Oznaka čelika</b> </div> </div>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
S235	0,22 maks.	1,60 maks.	0,05 maks.	0,05 maks.	0,05 maks.
S275	0,25 maks.	1,60 maks.	0,04 maks.	0,05 maks.	0,05 maks.
S355	0,23 maks.	1,60 maks.	0,05 maks.	0,05 maks.	0,05 maks.

Iz navedenih podataka vidljivo je da se maksimalne vrijednosti legirnih elemenata malo razlikuju te kemijski sastav nije striktno definiran, no mehanička svojstva su, u pogledu minimalne vrijednosti granice razvlačenja, zajamčena.

Za primjenu nelegiranih konstrukcijskih čelika odlučujuće su vrijednosti mehaničkih svojstava i zavarljivost. Vrijednosti mehaničkih svojstava ove skupine čelika kreću se u sljedećim rasponima [14]:

$$R_e = 190 - 370 \text{ MPa}$$

$$R_m = 330 - 700 \text{ MPa}$$

$$A_5 = 10 - 28 \text{ \%}.$$

Vrijednosti  $R_e$  ovise o dimenzijama (debljina), a tim su više što je viši % C i viši udio perlita u mikrostrukturi. Viša se čvrstoća postiže dodatkom Mn i Si te ostalih elemenata. Što je veći omjer Mn/C, to je veći udarni rad loma, posebno pri nižim temperaturama (manja sklonost krhkom lomu). Viši maseni udio Mn povisuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Temperature uporabe su od  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pri sniženim temperaturama povećana je opasnost od pojave krhkog loma. Otpornost na krhki lom biti će to viša što je niži maseni udio nečistoća i kod smirenih, odnosno posebno smirenih čelika [14].

Norme za nelegirane konstrukcijske čelike propisuju sljedeće karakteristike [14]:

- a) orijentacijski kemijski sastav
- b) mehanička svojstva:
  - $R_e$  (minimalne vrijednosti)
  - $R_m$  (raspon vrijednosti)
  - $A_5$  (minimalne vrijednosti)
  - $KV$
- c) tehnološka svojstva: kut savijanja.

### 4.3 Podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije

Podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije [14]:

- **0 S185** - Čelik trgovačke kvalitete bez zajamčenih svojstava. Primjenjuje se za određene svrhe za niskooterećene dijelove ili kao čelik za armirano – betonske konstrukcije.
- **A S235JRG1, S275JRG2** - Statički niže opterećene konstrukcije, spojene zakovicama i vijcima.
- **B S235JRG2, S355JRG2** - Zajamčen udarni rad loma pri +20 °C. Primjenjuje se za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma.
- **C S235J0G3, S275J0G3, S355J0G3** - Posebno smireni čelici. Zajamčeni udarni rad loma pri 0 °C. Statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije.
- **D S235J2G3, S275J2G3 i S355J2G3** - Posebno smireni i normalizirani. Zajamčena je vrijednost udarnog rada loma od 27 J pri -20 °C pa su čelici otporni na krhki lom. Statički i dinamički opterećene odgovorne zavarene konstrukcije i pri nižim temperaturama.

Zavarljivost čelika iz podskupina A, B, C, D osigurava niski maseni udio ugljika ( $< 0,2 \%$  C) što je povoljno i zbog udarnog rada loma. Posebno su zanimljivi čelici najviše čvrstoće: S355JRG3, S355J0G3 i S355J2G3 iz podskupina B, C, D zajamčenog udarnog rada loma. Iako se kod njih ta visoka čvrstoća postiže dodatkom Mn (do 1,5 %) i Si (do 0,55%) oni se ne smatraju legiranim. Ovi čelici imaju viši omjer  $R_e/R_m$ , što povisuje njihovu zareznu osjetljivost - ako dođe do koncentracije naprezanja, manja je mogućnost da se ona razgradi putem plastične deformacije. Inače, lomna žilavost - KIC (otpornost naglom širenju napukline) kod ove je skupine čelika vrlo dobra. Čelici iz podskupina A, B, C, D pronalaze primjene u konstrukcijama u građevinarstvu (dizalice, mostovi, platforme, stupovi dalekovoda), spremnicima tekućina i plinova, dijelovi vozila (npr. šasija), kosturi i oplata brodova te oprema na brodovima [14].



## 5. ODABIR DODATNOG MATERIJALA

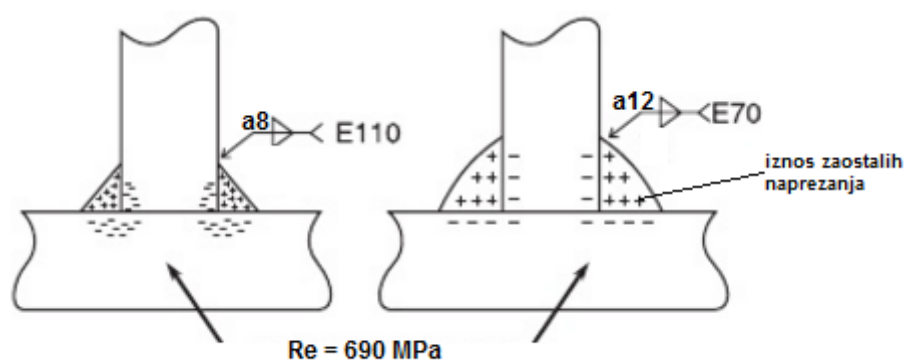
Odabir dodatnog materijala jedan je od najvažniji faktora za postizanje odgovarajuće čvrstoće i izdržljivosti zavarenog spoja. Nažalost, odabir dodatnog materijala nije jednostavan proces i ovisi o mnogo faktora [17]:

- osnovnom materijalu
- čvrstoći materijala koji se zavaruje
- opremi za zavarivanje
- položaju zavarivanja
- uvjetima eksploatacije
- toplinskoj obradi.

U proizvodnji, često se primjenjuju materijali zato jer imaju različita svojstva, često onakvima svojstvima koja su kontradiktorna. Teži se korištenju dodatnog materijala koji odgovara osnovnom materijalu. Druga mogućnost, koja se češće koristi u repariranju nego u proizvodnji novih dijelova, odabir je dodatnog materijala prema kvaliteti osnovnog materijala. Ukoliko materijal ima mnogo kontaminanata, preporuča se odabir dodatnog materijala koji ima uključen u sebi dezoksidanse koji povlače kontaminante na površinu zavara umjesto da oslabljuju cijeli zavar [17].

Čvrstoća dodatnog materijala, također, ovisi o materijalu koji se zavaruje. Teži se odabiru dodatnog materijala koji ima jednaku ili višu čvrstoću u odnosu na osnovni materijal [17].

U većini slučajeva, koristi se navedena metoda odabira čvrstoće dodatnog materijala. No, moguće je i odabrati dodatni materijal koji ima nižu čvrstoću u odnosu na osnovni materijal. Na taj način smanjuju se unesena zaostala naprezanja te je dobiveni spoj duktilniji. Zbog toga, tendencija nastajanja pukotina mnogo je niža. Navedena praksa najčešće se koristi kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće. S uporabom navedene metode treba biti na oprezu jer smanjenjem čvrstoće dodatnog materijala potrebno je povećati sam zavar (npr. kod kutnog spoja povećava se veličina kutnog zavara – slika 29.).



**Slika 29. Veličina zavora u ovisnosti o čvrstoći dodatnog materijala [18]**

U pogledu opreme, važan je promjer dodatnog materijala (žice). Ukoliko izvor struje za zavarivanje ne može pružiti dovoljnu jakost struje za odabranu žicu, mora se odabrati žica manjeg promjera ili izvor struje koji može omogućiti potrebnu jakost struje [17].

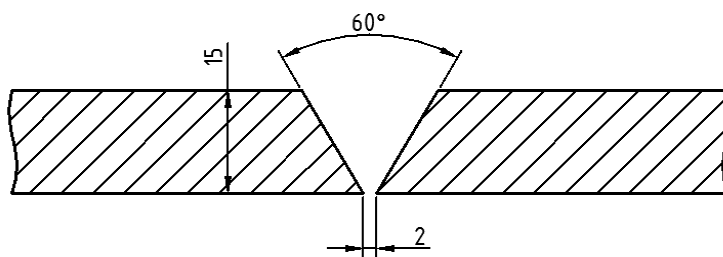
Dodatni materijali koji su konstruirani za horizontalne zavare, najčešće su najčvršći s niskom poroznošću. Ukoliko je spoj kreiran tako da zahtijeva zavarivanje u drugačijem položaju, mora se odabrati dodatni materijal koji zadovoljava potrebe tog položaja zavarivanja [17].

Sljedeći faktor za odabir dodatnog materijala su eksploatacijski uvjeti. Ukoliko će zavar biti pod utjecajem vibracija ili naprezanja, odabire se dodatni materijal koji zadovoljava navedene uvjete. Također, ako će zavar biti izložen vodi, tlaku ili vrućim atmosferama, uvjete eksploatacije treba uzeti u obzir [17].

Ukoliko se zavaruje deblje materijale ili posebne vrste čelika, osnovni materijal treba se predgrijati s ciljem izbjegavanja skupljanja u zavaru i mogućih nastanka pukotina kad se radni komad ohladi. Također, neki materijali zahtijevaju dodatnu toplinu da se uspori proces hlađenja. Ako se zavaruju takvi čelici, odabire se dodatni materijal koji će biti prikladan za produženi period hlađenja [17].

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno istražiti utjecaj dodatnog materijala na nastale deformacije prilikom zavarivanja konstrukcijskog čelika. Zavarivanje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Zavarene su tri ploče čelika S355 debljine 15 mm različitim dodatnim materijalima. Ploče su prethodno plinski odrezane na dimenzije 128 x 345 mm (š x d) i naknadno strojno obrađene. Priprema spoja „V“ je vidljiva na slici 30. Dobivene deformacije bilo je potrebno izmjeriti te vrijednosti usporediti s rezultatima dobivenim simulacijom u programskom paketu Visual – Environment.

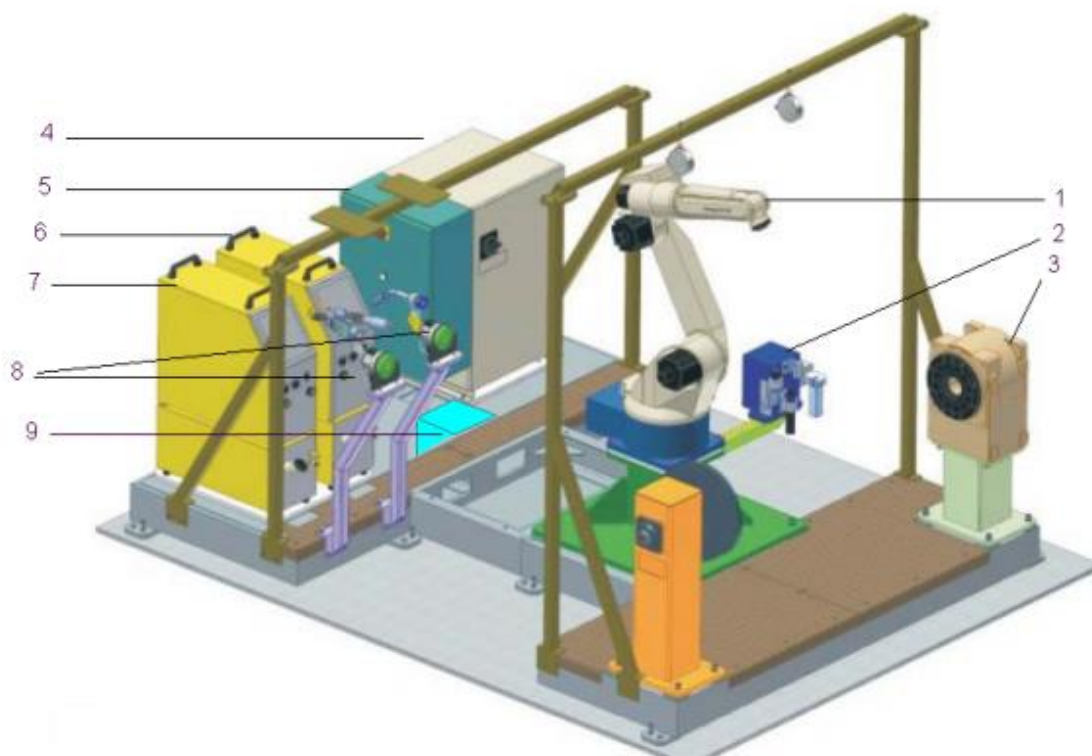


Slika 30. Priprema spoja za sučeljeno zavarivanje

### 5.1 Provedba zavarivanja

Realan eksperiment izvodi se na robotskoj stanici *VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm* zbog potrebe konstante brzine zavarivanja i ponovljivosti rezultata. Stanica se sastoji od sljedećih komponenti (slika 31.):

- 1) robota *OTC Almega AX-V6*
- 2) uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja kapljica
- 3) pozicionera *P250V ROBO*
- 4) električne jedinice
- 5) upravljačke jedinice
- 6) izvora struje *MIG/MAG VPS 4000*
- 7) izvora struje *TIG VARTIG 3500 DC/AC*
- 8) sustava za automatsku izmjenu pištolja
- 9) senzora električnog luka *AX-AR*.



**Slika 31. Prikaz robotske stanice [19]**

Kao što je to vidljivo na slici 31., robotska stanica sastoji se od dva izvora struje. Budući da je spoj veće debljine zavaruje se MAG postupkom zavarivanja. Zbog toga, koristi se izvor struje *MIG/MAG VPS 4000* (slika 32.). Navedeni invertorski izvor struje opremljen je vodenim hlađenjem što je nužno kod automatiziranih sustava. Izvor podržava tri režima rada: klasično MIG/MAG zavarivanje i impulsno MIG/MAG zavarivanje. Zbog navedenih mogućnosti, osim za zavarivanje konstrukcijskih i nehrđajućih čelika, moguće ga je koristiti za zavarivanje aluminijskih i ostalih raznih legura. Uređaj je opremljen digitalnim sučeljem na kojem se vrlo lako prate parametri zavarivanja (struja i napon).



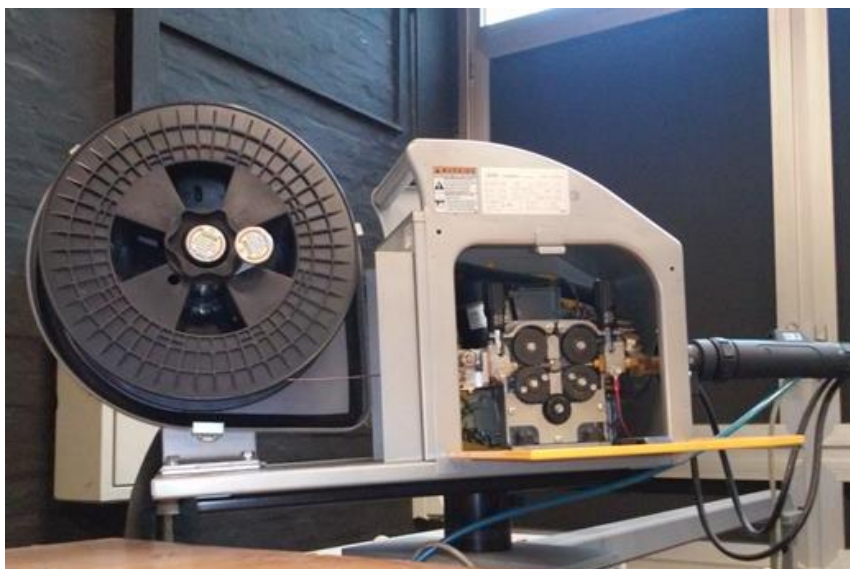
**Slika 32. Izvor struje za zavarivanje MIG/MAG VPS 4000 digit**

Tablica 2. prikazuje tehničke karakteristike korištenog izvora struje. Navedeni izvor struje ima 100% intermitenciju pri struji 283 A te ga je moguće koristiti sve do 400 A. Promjer žice koji se može koristiti na uređaju je od 0,8 – 1,2 mm.

**Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje VPS 4000 digit [19]**

<b>VPS 4000 digit</b>	
Priključni napon	3~400 V/50 Hz
Područje struje zavarivanja	30 – 400 A
Napon	15,5 – 34 V
Intermitencija 50%	400 A
Intermitencija 100%	283 A
Promjer žice za zavarivanje	0,8 – 1,2 mm

Kao dodavača dodatnog materijala za zavarivanje upotrebljavao se model *CM-7401* (slika 33.).



**Slika 33. Dodavač žice**

Za mjerenje temperature upotrebljavao se infracrveni termometar tvorničkog naziva 568 *Infrared Thermometer* (slika 34.). Postupak mjerenja sastoji se od usmjeravanja čitača u željenu točku te očitavanja vrijednosti temperature.



**Slika 34. 568 Infrared Thermometer [20]**

Za sva tri korištena dodatna materijala koristio se isti zaštitni plin, *Ferroline C18* (plinska mješavina 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>), koji se prema normi HRN EN ISO 14175 označava M21.

### 5.1.1 Zavarivanje spoja 1

Spoj 1 zavaren je dodatnim materijalom, žicom SG2 promjera 1,2 mm (kemijski sastav dan je Tablicom 3.).

**Tablica 3. Kemijski sastav SG2 [21]**

Kemijski element	Maseni udio, %
Ugljik (C)	0,08
Silicij (Si)	0,85
Mangan (Mn)	1,5

Zavarivanje je provedeno u PA položaju. Prije samog zavarivanja, na pločama su izvedeni prihvatni zavari te je postavljena keramička podloška s ciljem omogućavanja zavarivanja korijenskog prolaza većim strujama. Pripremljeni spoj prikazuje slika 35.



**Slika 35. Spoj 1 pripremljen za zavarivanje**

Tablica 4. prikazuje primjenjene parametre zavarivanja svih prolaza. Napon i struja zavarivanja očitavani su direktno s izvora struje te su njihove vrijednosti različite u odnosu na vrijednosti definirane na privjesku za učenje. Brzina zavarivanja je konstanta te iznosi 400 mm/min. Na temelju navedenih parametara zavarivanja te iskoristivosti procesa koji za MAG proces zavarivanja iznos 0,8, izračunava se unos topline. Unos topline izračunava se prema formuli:

$$Q = \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} \times \eta, \text{ kJ/mm} \quad (3)$$

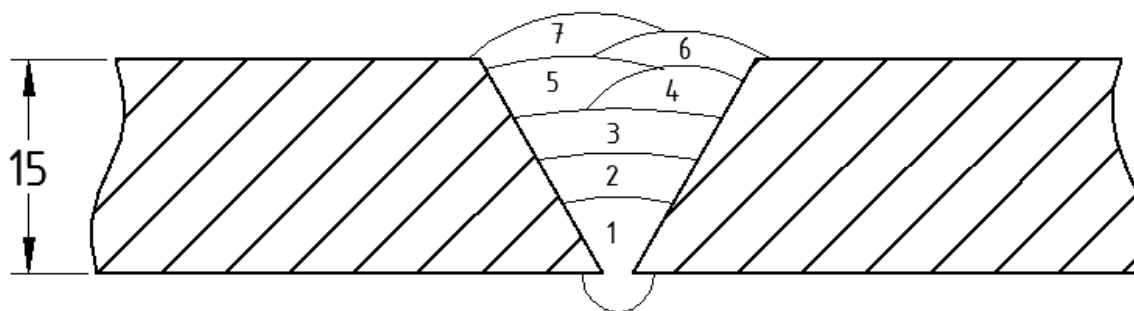
Unos topline varira od 0,8 – 1,1 kJ/mm. Također, vidljiva je srednja vrijednost temperature spoja neposredno prije zavarivanja koja se mjeri na tri mjesta. Da bi se kasnije simulacija provela što sličnije realnom procesu, potrebno je specificirati vrijeme početka zavarivanja svakog prolaza. Navedeni podaci su, također, vidljivi u tablici 4.

**Tablica 4. Parametri zavarivanja spoja 1**

Prolaz	I, A	U, V	v, mm/min	Q, kJ/mm	Dodatni materijal	Plin/protok	Početna temp. ploča, °C	t, s
1	250	27	400	0,81	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	25,5	0
2	280	27,5	400	0,92	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	30,0	2975
3	310	27	400	1,00	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	53,0	3775
4	290	26,7	400	0,93	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	67,2	4645
5	310	27	400	1,00	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	89,1	5210
6	325	27,5	400	1,07	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	105,3	5860
7	300	27,2	400	0,98	SG 2/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	116,5	6490

Prolazi 1, 2 i 3 izvode se s početkom na jednom kraju spoja dok prolazi 4, 5, 6 i 7 se izvode s početkom na drugom kraju ploča. Na taj način izbjegava se nakupljanje metala zavara na jednoj strani koji nastaje zbog veće startne struje. Shematski prikaz položaja svakog prolaza vidljiv je na slici 36.





**Slika 36. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 1**

Slika 37. i slika 38. prikazuju nastale deformacije nakon provedenog procesa zavarivanja. Vidljivo je da je došlo do neznatnog savijanja ploča te, velikog po iznosu, iskrivljenja. Ono se dogodilo zbog izvedbe pripreme spoja „V“. Naime, prema površini osnovnog materijala, otvor pripreme sve je veći. Potrebna je veća količina dodatnog materijala da se otvor popuni. Veća količina dodatnog materijala znači veće stezanje, a time i veće deformacije.



**Slika 37. Iskrivljenje spoja 1**



**Slika 38. Savijanje spoja 1**

### 5.1.2 Zavarivanje spoja 2

Spoj 2 zavaren je dodatnim materijalom, žicom *LINCOLN MIG 309LSi* promjera 1,2 mm. Kemijski sastav dodatnog materijala prikazuje tablica 5. Dodatni materijal ima visoki udio silicija (Si) što poboljšava kvašenje. Iako se za navedeni dodatni materijal preporučuje zaštitni plin u obliku mješavine  $\text{Ar} + (0,5 - 5)\% \text{CO}_2 / (0,5 - 3)\% \text{O}_2$ , korištena je ista mješavina kao i za spoj 1.

**Tablica 5. Kemijski sastav *Lincoln MIG 309LSi* [22]**

Kemijski element	Maseni udio, %
Ugljik (C)	0,02
Mangan (Mn)	1,8
Silicij (Si)	0,8
Krom (Cr)	23,3
Nikal (Ni)	13,8
Molidben (Mo)	0,14

Također, zavarivanje je provedeno u PA položaju, izvedeni su prihvatni zavari te je postavljena keramička podloška (slika 39.). Točke mjerenja temperature identične su točkama mjerenja temperature spoja 1 da bi se podaci mogli usporediti.



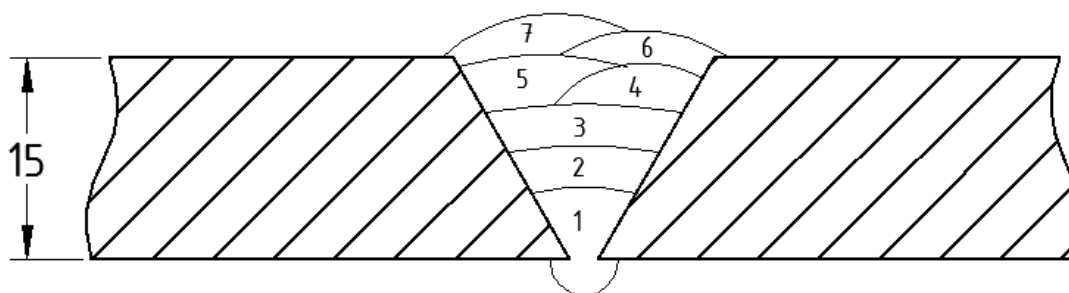
**Slika 39. Pripremljeni spoj 2 za zavarivanje**

Također, prilikom procesa prate se parametri zavarivanja na izvoru struje. Tablica 6. prikazuje prikupljene podatke. Brzina zavarivanja identična je brzini zavarivanja spoja 1 dok se struja i napon malo razlikuju. Unos topline izračunava se prema istoj formuli kao i za spoj 1. Zbog malo različitijih parametara zavarivanja, razlikuje se i unos topline. No, ta razlika nije prevelika te se zanemaruje. Proces zavarivanja spoja 2 znatno je kraći, ali razlika u temperaturi spoja znatno se ne razlikuje. Zbog toga, duže hlađenje spoja 1 se zanemaruje.

**Tablica 6. Parametri zavarivanja spoja 2**

Prolaz	$I$ , A	$U$ , V	$v$ , mm/min	$Q$ , kJ/mm	Dodatni materijal	Plin/protok	Početna temp. ploča, °C	$t$ , s
1	250	28	400	0,84	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	25,0	0
2	275	27,2	400	0,90	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	53,5	735
3	275	25	400	0,82	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	58,2	1710
4	305	26,6	400	0,97	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	64,1	2680
5	305	26,9	400	0,98	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	85,5	3305
6	275	26,7	400	0,88	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	100,1	4130
7	280	25,4	400	0,85	309LSi/ 1,2 mm	C18/ 18 l/min	99,1	4745

Da bi proces bio što sličniji procesu zavarivanja spoja 1, prolazi 1, 2 i 3 izvode se s početkom na jednom kraju ploča dok se prolazi 4, 5, 6 i 7 izvode s početkom na drugom kraju. Položaj pojedinih prolaza bitno se ne razlikuje od položaja prolaza spoja 1 (slika 40.).



**Slika 40. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 2**

Dobivene deformacije prikazuju slika 40. i slika 41. Također, došlo je do neznatnog savijanja spoja te do, po iznosu znatnog, iskrivljenja. Nastalo iskrivljenje veće je po iznosu, u odnosu na spoj 1, iako je unos topline nešto niži. Dobiveni rezultat je očekivan jer austenitni čelik ima veći koeficijent toplinskog rastezanja. Naime, koeficijent toplinskog rastezanja konstrukcijskog čelika,  $\alpha_{kč}$ , približno iznosi  $10,8 \times 10^{-6} /K$  dok austenitnog,  $\alpha_{ač}$ , približno iznosi  $17,2 \times 10^{-6} /K$ . Prilikom zavarivanja, metal zavora se više produži te naknadno skupi pa je nastala sila veća.



**Slika 41. Iskrivljenje spoja 2**



**Slika 42. Savijanje spoja 2**

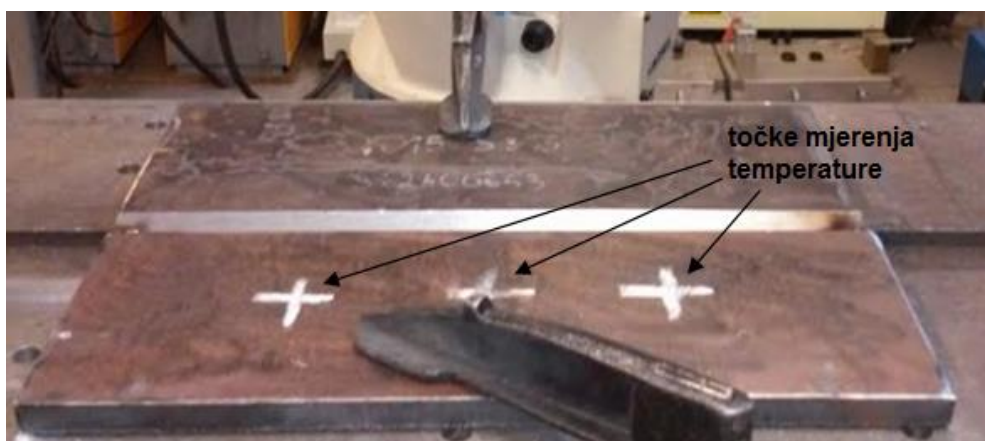
### 5.1.3 Zavarivanje spoja 3

Spoj 3 zavaren je drugačijim dodatnim materijalom, praškom punjenom žicom. Korištena je žica *Megafil – 550R* promjera 1,2 mm. Kemijski sastav navedenog dodatnog materijala prikazuje tablica 7. Navedeni dodatni materijal koristi se za zavarivanje nelegiranih i sitnozrnatih čelika te je prikladan za automatizirane procese. Difuznost vodika dodatnog materijala je vrlo niska što smanjuje vjerojatnost pojave pukotina.

**Tablica 7. Kemijski sastav *Megafil – 550R* [23]**

Kemijski element	Maseni udio, %
Ugljik (C)	0,08
Mangan (Mn)	1,5
Silicij (Si)	0,5
Sumpor (S)	0,015
Fosfor (P)	0,015
Nikal (Ni)	1,5
Molibden (Mo)	< 0,02

Zavarivanje je provedeno u PA položaju, na pločama je izveden prihvatni zavar te postavljena keramička podloška (slika 43.). Također, mjerena je temperatura spoja na identičnim točkama kao i za spoj 1 i 2.



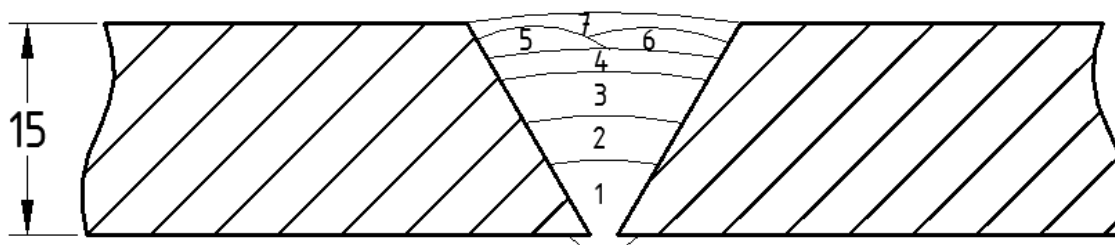
**Slika 43. Pripremljeni spoj 3 za zavarivanje**

Tablica 8. prikazuje parametre zavarivanja. Brzina zavarivanja iznosi 400 mm/min kao i za spoj 1 i 2 izuzevši zadnji prolaz u kojem je brzina niža zbog izvedenog njihanja. U tom prolazu sniženi su parametri zavarivanja, napon i struja, da bi unos topline ostao isti. Unos topline svih prolaza približno je jednak kao kod spojeva 1 i 2. Trajanje procesa je, također, približno jednako no temperatura spoja u zadnja dva prolaza je niža.

**Tablica 8. Parametri zavarivanja spoja 3**

Prolaz	$I$ , A	$U$ , V	$v$ , mm/min	$Q$ , kJ/mm	Dodatni materijal	Plin/protok	Početna temp. ploča, °C	$t$ , s
1	270	26,1	400	0,84564	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	33	0
2	280	25,3	400	0,85008	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	56,2	595
3	270	25,4	400	0,82296	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	78,4	1050
4	280	24,5	400	0,8232	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	74,1	1680
5	305	25,2	400	0,92232	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	89,7	2290
6	300	25,3	400	0,9108	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	83,1	3200
7	190	21	200	0,9576	Mega fil - 550 R	C18/18 l/min	60	5160

Identično spojevima 1 i 2, prolazi 1, 2 i 3 izvode se s početkom s jedne strane ploča, a prolazi 4, 5, 6 i 7 s druge strane ploča. Položaj prolaza razlikuje se u odnosu na položaj prolaza spoja 1 i 2 (slika 44.).



**Slika 44. Shematski prikaz svih prolaza zavarivanja spoja 3**



Dobivene deformacije prikazuju slika 45. i slika 46. Također, dominantna vrijednost deformacije je u pogledu iskrivljenja spoja. Usporedivši sva tri spoja, iznos iskrivljenja je sličan iskrivljenju spoja 1 no ipak niži. Razlog najmanjem iznosu deformacije je manja količina depozita dodatnog materijala (dodatni materijal nije žica punog presjeka). Smanjenje depozita vidljivo je i na samom spoju, izveden je isti broj prolaza sličnim parametrima no dobiveno nadvišenje je puno niže u usporedbi sa spojem 1 i 2.



**Slika 45. Iskrivljenje spoja 3**



**Slika 46. Savijanje spoja 3**

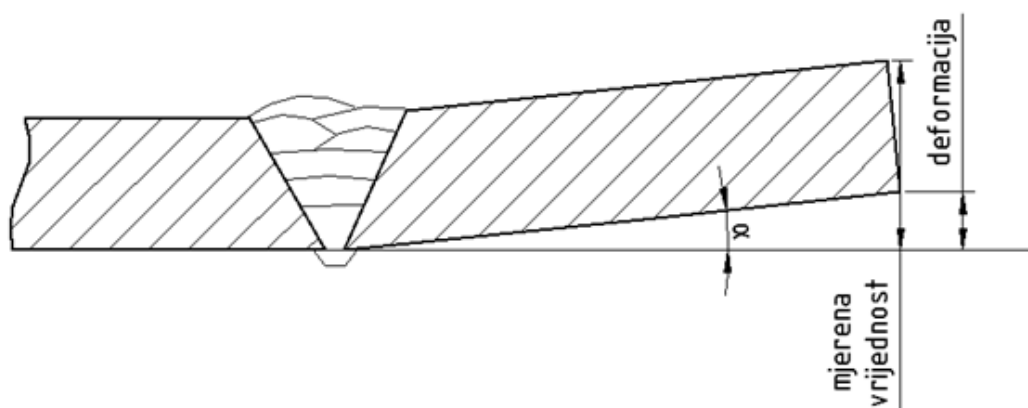
#### **5.1.4 Mjerenje deformacija**

Deformacije su se mjerile pomoću pomičnog mjerila. Spoj se stegnuo u jednoj točki te se duž ploče mjerio iznos deformacije na sedam mjesta (slika 47.). Na svakom mjestu, mjerenje se ponavilo dva puta te, kao mjerena vrijednost, uzima se srednja vrijednost. Dobivene vrijednosti preračunate su kako bi se dobio točan iznos deformacije spoja.



Slika 47. Točke mjerenja deformacija

Metodu izračuna deformacija prikazuje slika 48. Poznata je udaljenost između sredine zavora i krajnje točke ploče, 130 mm. Također, poznata je debljina ploče, 15 mm te mjerena vrijednost. Pomoću sličnosti trokuta izračunava se ukupan iznos deformacije. Ta vrijednost je vrijednost deformacije obje ploče. Budući da je potrebno izračunati vrijednost deformacije ploče, ukupan iznos se podijeli s dva te se dobije prosječna vrijednost.



Slika 48. Metoda izračuna deformacija



Kao što je to prethodno navedeno, deformacije se mjere u sedam točaka te se mjerenje u svakoj točki ponavlja dva puta. Izračunava se srednja mjerena vrijednost za svaku točku te izračunava ukupna deformacija. Izmjerene i izračunate navedene vrijednosti deformacije spoja 1 prikazuje tablica 9. Maksimalna vrijednost deformacije ploče spoja 1 iznosi 7,48 mm u točki 6, 287,5 mm udaljenoj od lijevog ruba. Minimalna vrijednost deformacije iznosi 6,995 mm u točki 1. Srednja vrijednost deformacije ploče iznosi 7,32 mm.

**Tablica 9. Vrijednosti deformacija spoja 1**

Točke mjerenja	Udaljenost, mm	Mjerena vrijednost [mm]			Ukupna deformacija, mm	Deformacija ploče, mm
		1. mjerenje	2. mjerenje	$\bar{X}$		
1.	0,0	28,90	28,90	28,90	13,99	7,00
2.	57,5	29,20	29,40	29,30	14,39	7,20
3.	115,0	29,50	29,60	29,55	14,64	7,32
4.	172,5	29,80	29,70	29,75	14,85	7,43
5.	230,0	29,80	29,70	29,75	14,85	7,43
6.	287,5	29,90	29,80	29,85	14,95	7,48
7.	345,0	29,70	29,80	29,75	14,85	7,43
						$\bar{X} = 7,32$

U tablici 10. vidljive su vrijednosti deformacije spoja 2. Maksimalna vrijednost deformacije ploče spoja 2 iznosi 11,06 mm u točki 4, udaljenoj 172,5 mm od lijevog ruba. Minimalna vrijednost deformacije iznosi 10,60 mm, u točki 1. Usporedivši maksimalnu vrijednost deformacije ploče spoja 1 i spoja 2, deformacija ploče spoja 2 veća je za približno 45 % u odnosu na deformaciju ploče spoja 1. Srednja vrijednost deformacije ploče spoja 2 iznosi 10,84 mm. U odnosu na srednju vrijednost deformacije ploče spoja 1, povećanje približno iznosi 50 %.

Tablica 10. Vrijednosti deformacija spoja 2

Točke mjerjenja	Udaljenost, mm	Mjerena vrijednost [mm]			Ukupna deformacija, mm	Deformacija ploče, mm
		1. mjerjenje	2. mjerjenje	$\bar{X}$		
1.	0,0	36,00	36,00	36,00	21,20	10,60
2.	57,5	36,50	36,30	36,40	21,60	10,80
3.	115,0	36,70	36,20	36,45	21,65	10,83
4.	172,5	36,90	36,90	36,90	22,11	11,06
5.	230,0	36,90	36,80	36,85	22,06	11,03
6.	287,5	36,60	36,50	36,55	21,76	10,88
7.	345,0	36,10	36,20	36,15	21,35	10,68
						$\bar{X} = 10,84$

Tablica 11. prikazuje vrijednosti deformacije spoja 3. Maksimalna vrijednost deformacije ploče spoja 3 iznosi 6,74 mm u točki 3, udaljenoj 115,0 mm od lijevog ruba. Minimalna vrijednost deformacije iznosi 6,57 mm u točki 2. Srednja vrijednost deformacije ploče spoja 3 iznosi 6,68 mm. U odnosu na maksimalnu deformaciju ploče spoja 1, vidljivo je smanjenje u iznosu od približno 10 %. Prethodno naveden, razlog smanjenja deformacije je manji depozit korištenog dodatnog materijala. Ukoliko se u odnos postave maksimalna deformacija ploče spoja 2 i spoja 3, smanjenje približno iznosi 65 %.

Tablica 11. Vrijednosti deformacija spoja 3

Točke mjerjenja	Udaljenost, mm	Mjerena vrijednost [mm]			Ukupna deformacija, mm	Deformacija ploče, mm
		1. mjerjenje	2. mjerjenje	$\bar{X}$		
1.	0,0	28,20	28,40	28,30	13,38	6,69
2.	57,5	28,00	28,10	28,05	13,13	6,57
3.	115,0	28,50	28,30	28,40	13,48	6,74
4.	172,5	28,30	28,30	28,30	13,38	6,69
5.	230,0	28,30	28,30	28,30	13,38	6,69
6.	287,5	28,30	28,30	28,30	13,38	6,69
7.	345,0	28,20	28,30	28,25	13,33	6,67
						$\bar{X} = 6,68$

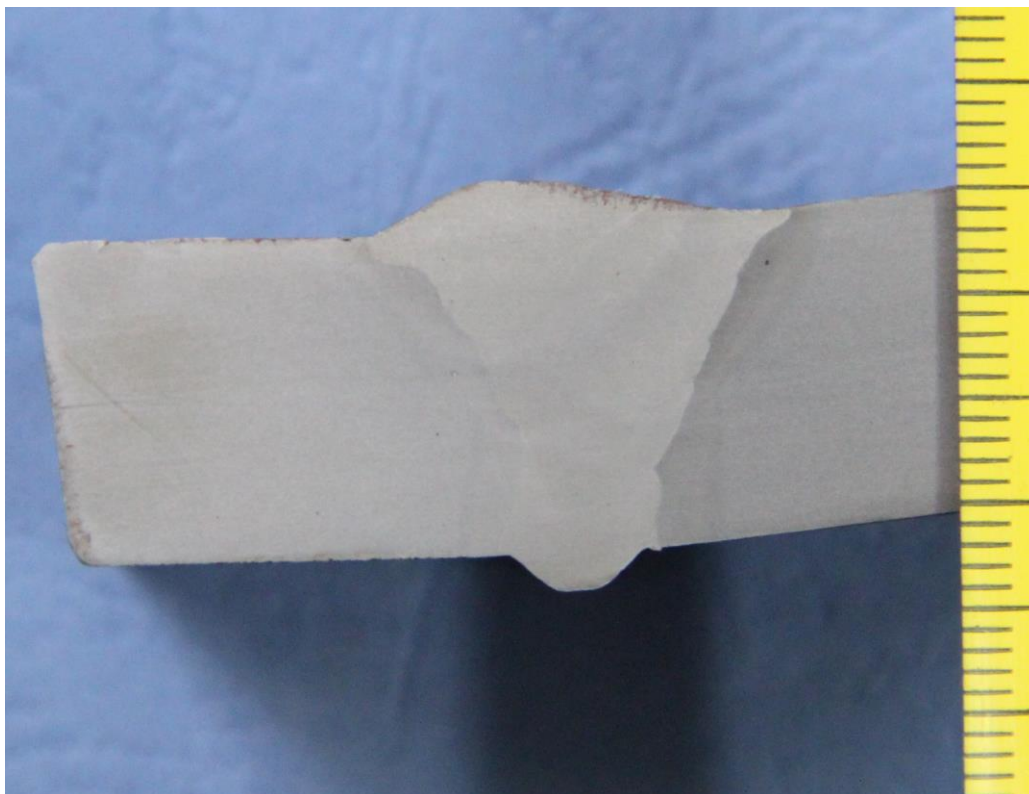
### 5.1.5 Makroanaliza

S ciljem što točnije izrade simulacije zavarivanja potrebno je izraditi makroizbruske spojeva. Na makroizbruscima vidljiva je zona protaljivanja i zona utjecaja topline za svaki prolaz pomoću koje se kalibira unos topline svakog prolaza. Iz svakog spoja, plinski su se odrezale trake (slika 49.) koje su se, kasnije, tračnom pilom odrezale na uzorke dimenzija približno 60 x 35 mm. Svaki uzorak fino je pobrušen.



Slika 49. Plinsko rezanje traka

Nakon što se uzorci pobruse, potrebno ih je nagristi. Nagrizanje je izvršeno u Laboratoriju za zaštitu materijala. Uzorak 1 nagrizen je u 5% otopini nital-a. Nital je otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu. Vrijeme nagrizanja je 50 s. Dobivene rezultate prikazuje slika 50. Na slici je vidljiva zona protaljivanja i zona utjecaja topline. Također, uočava se korektno izvođenje zavora, bez naljepljivanja, pora i pukotina na uzorku.



**Slika 50. Makroizbrusak 1 (SG2 dodatni materijal)**

Uzorak 2 je nagrizen, ali elektrokemijski. Vrijeme nagrizanja iznos 120 s. Dobiveni rezultat prikazuje slika 51. Za razliku od uzorka 1, nije vidljiva zona utjecaja topline već samo zona protaljivanja. Razlog tome je uporaba drugog dodatnog materijala. Također, uočeno je korektno izvođenje zavora, bez naljepljivanja, pora i pukotina na uzorku.



**Slika 51. Makroizbrusak 2 (*Lincoln MIG 309LSi* dodatni materijal)**

Uzorak 3 nagrižen je kemijski, u otopini nital-a, vrijeme nagrizanja, također, iznosi 50 s. Dobivene rezultate prikazuje slika 52. Uočava se slabija vidljivost zone utjecaja topline te niže nadvišenje korijena u odnosu na prethodne uzorke.



**Slika 52. Makroizbrusak 3 (*Megafil – 550R* dodatni materijal)**

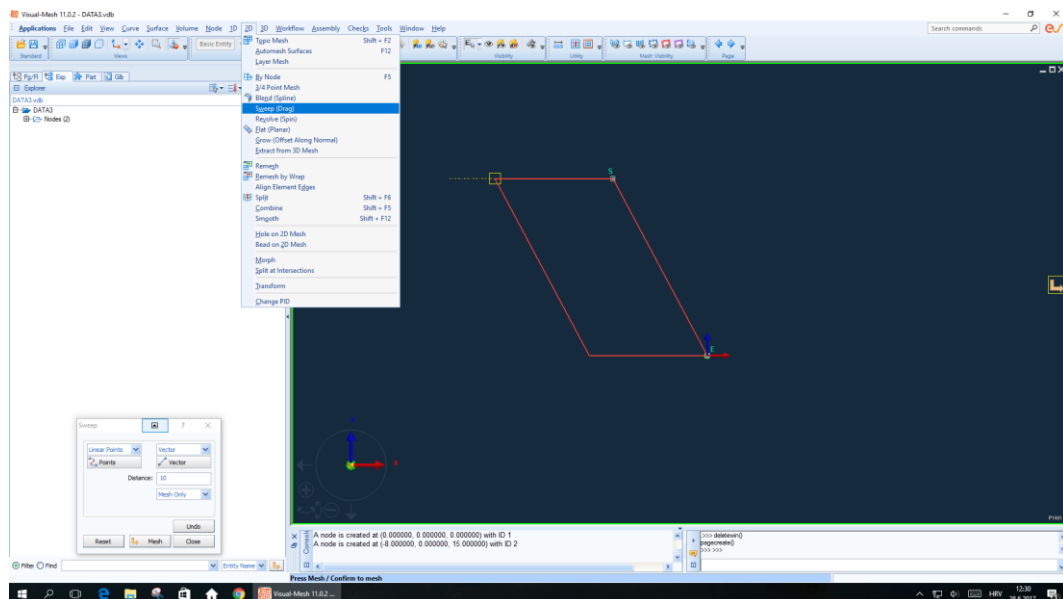
Sva tri makroizbruska nisu prethodno polirana te zbog nemogućnosti njihovog cjelokupnog promatranja na mikroskopu slabije se uočavaju detalji.

## 5.2 Simulacija zavarivanja

U drugom dijelu eksperimentalnog rada provodi se simulacija zavarivanja u programskom paketu Visual – Environment 11.0.2. Programski paket sastoji se od više programskih modula, no za potrebe simulacije zavarivanja potrebna su samo tri modula: Visual – Mesh, Visual – Weld i Visual – Viewer. Svaki od modula zaseban je, ali za potpunu izradu, provođenje te očitavanje rezultata simulacije potreban je kombiniran rad u njima.

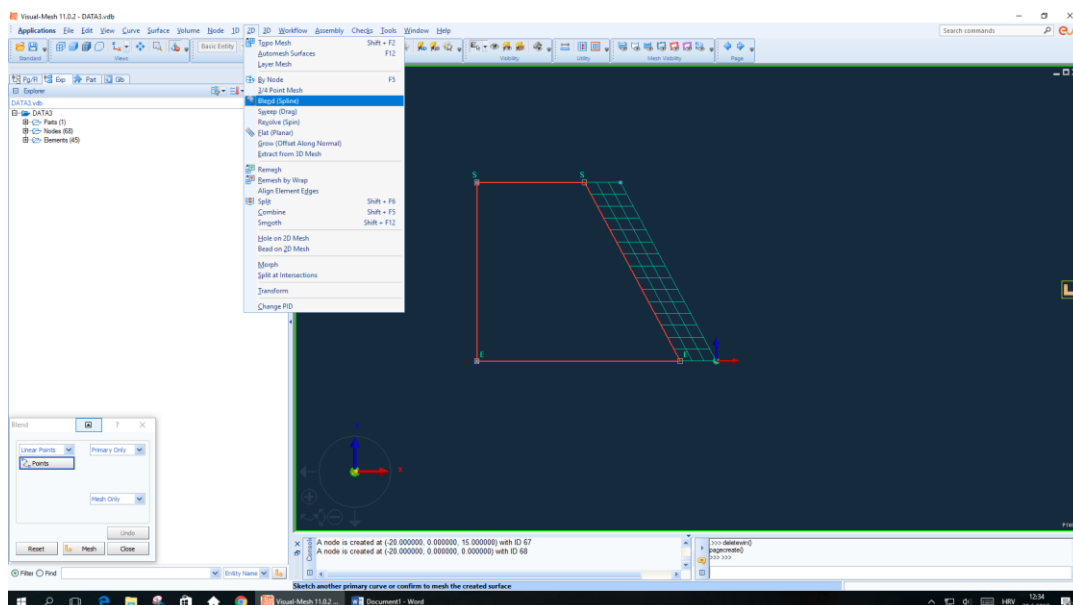
### 5.2.1 Visual – Mesh

U Visual – Mesh-u kreira se model na kojem je provedena simulacija te služi za definiranje kolektora. Model koji se izrađuje mora biti što sličniji realnom modelu da bi simulacija zavarivanja bila što sličnija realnom zavarivanju. Prilikom izrade modela vrlo je važno obratiti pažnju na veličini konačnih elemenata. Naime, manji konačni elementi kao rezultat daju točnije vrijednosti no vrijeme simulacije puno je duže. Zbog toga, potrebno je pronaći kompromis. Kompromis se postiže na sljedeći način: u području zavarenog spoja (zona utjecaja topline i sam metal zavara) kreiraju se konačni elementi manjih dimenzija koji osiguravaju točnost simulacija. U tom području zbivaju se najveće promjene, a time i najveći utjecaj na točnost simulacije. Udaljavanjem od zone utjecaja topline, promjene u materijalu su sve manje pa povećanjem konačnih elemenata uvelike ne utječemo na rezultat simulacije, a smanjujemo njezino trajanje. Slijedeći navedeno razmišljanje kreira se model potreban za simulaciju. U prvom koraku potrebno je izraditi 2D mrežu. Za izradu navedene mreže koriste se dvije opcije: „Sweep“ i „Blend“. Opcija „Sweep“ koristi se za kreiranje 2D uzorka (slika 53.). Pomoću opcije „Node“ kreiraju se točke u ravnini koje predstavljaju krajnje točke skošenja ploče. Te dvije točke predstavljaju linearan uzorak pomoću kojeg se dalje kreira 2D mreža. Svakim pomakom kreiranih 2D elemenata možemo upravljati na način da odabiremo duljinu pomaka te broj čvorova na svim stranicama 2D mreže. Postupak se ponavlja do određene udaljenosti u kojoj nam veličina konačnih elemenata više nije bitna, tj. dolazimo do maksimalne željene veličine konačnih elemenata.



Slika 53. Prikaz opcije „Sweep“

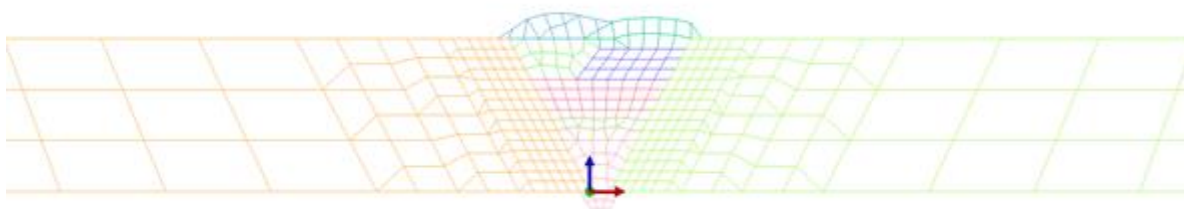
Nakon dolaska do mjesta maksimalnog pogrublјivanja konačnih elemenata u navedenoj osi, koristi se opcija „Blend“ (slika 54.). Budući da početak i kraj ploče nisu istog uzorka, nije moguće iskoristiti opciju „Sweep“ da se dobiju konačne dimenzije ploče. Opcija „Blend“ koristi se na sličan način kao i opcija „Sweep“ s iznimkom da je potrebno odabrati početan i konačan uzorak.



Slika 54. Prikaz opcije „Blend“

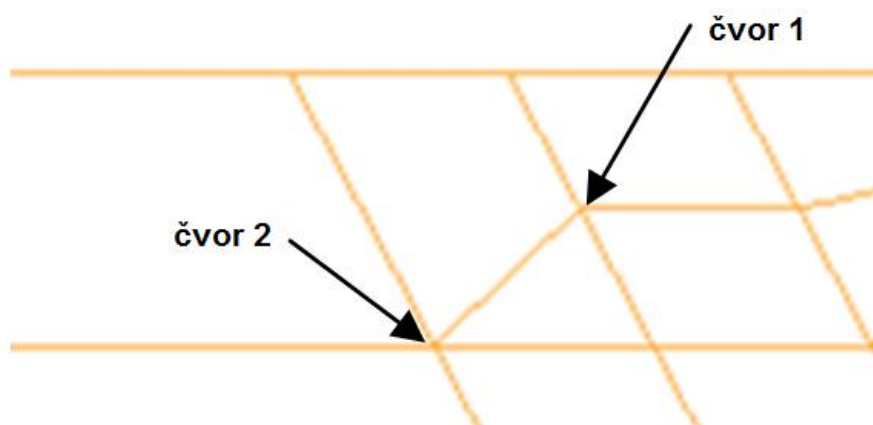


Korištenjem navedenih opcija i razmišljanja, kreira se 2D mreža vidljiva na slici 55. Dimenzije modela su izmjerene dimenzije na stvarnim uzorcima da bi simulacija što točnije odgovarala realnom procesu.



Slika 55. Kreirana 2D mreža

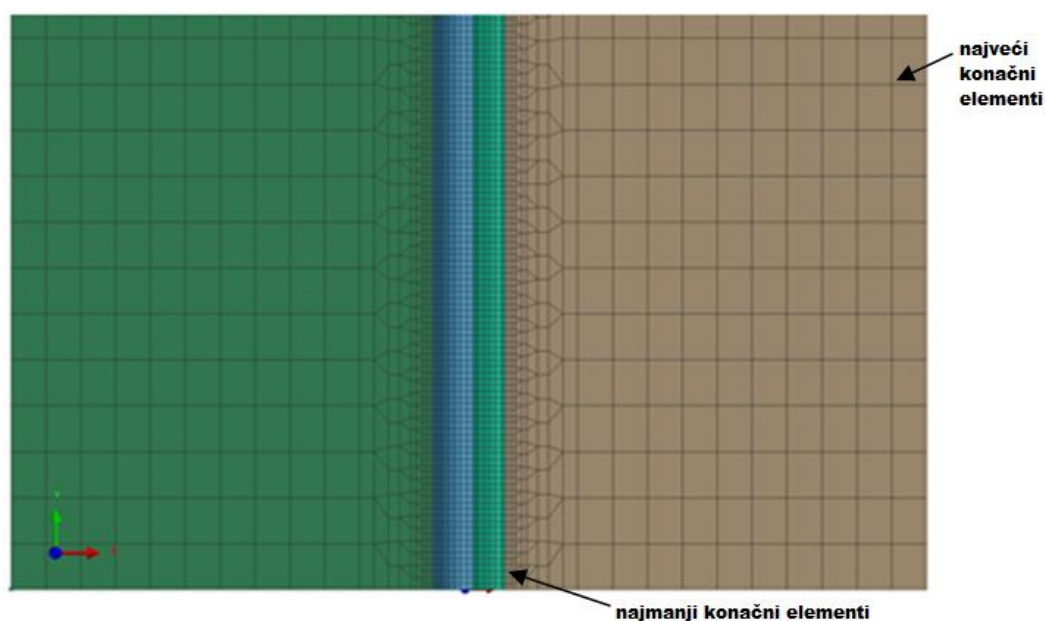
Kod povećanja konačnih elemenata, veliku pažnju treba obratiti na čvorove. Naime, povećanjem veličine konačnih elemenata potrebno je izraditi model na način da su čvorovi manjih konačnih elemenata povezani s čvorovima većih konačnih elemenata (slika 56.).



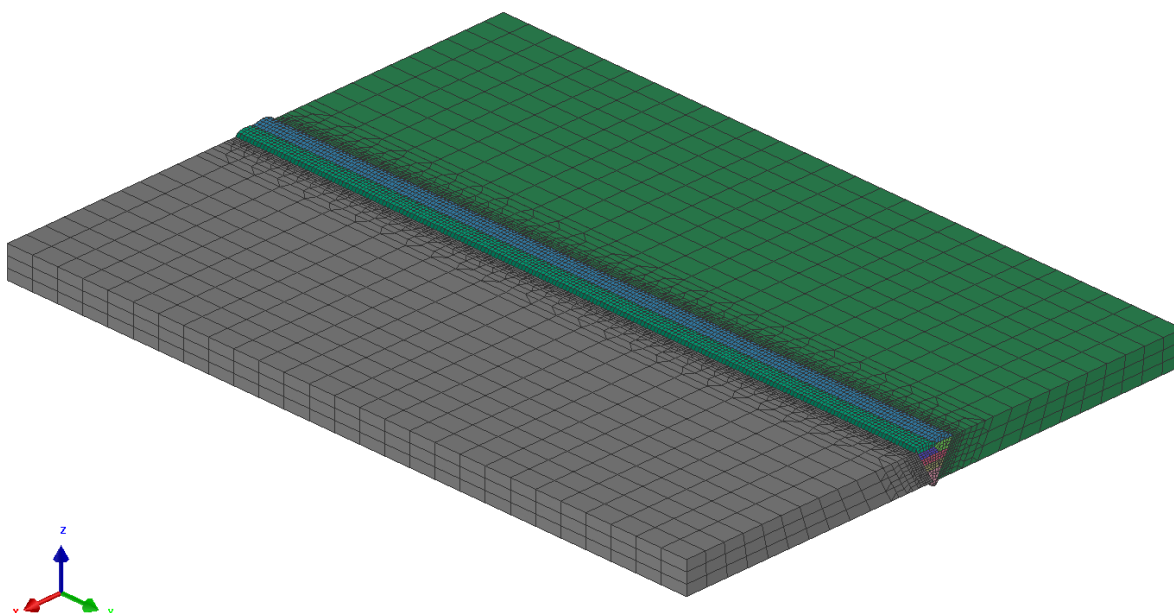
Slika 56. Način povećanja konačnih elemenata

Nakon izrade dvodimenzionalne mreže, potrebno je mrežu ekstrudirati u treću os i na taj način kreirati trodimenzionalne konačne elemente. Opcija koja se koristi je „3D Sweep“. No, ukoliko bi se cijela kreirana dvodimenzionalna mreža identično kreirala u treću os, broj konačnih elemenata bio bi prevelik. Zbog toga, dvodimenzionalna mreža se i u trećoj osi pogrubljuje na identičan način kao što je to prethodno objašnjeno. Dobivene trodimenzionalne konačne elemente u tlocrtu prikazuje slika 57.

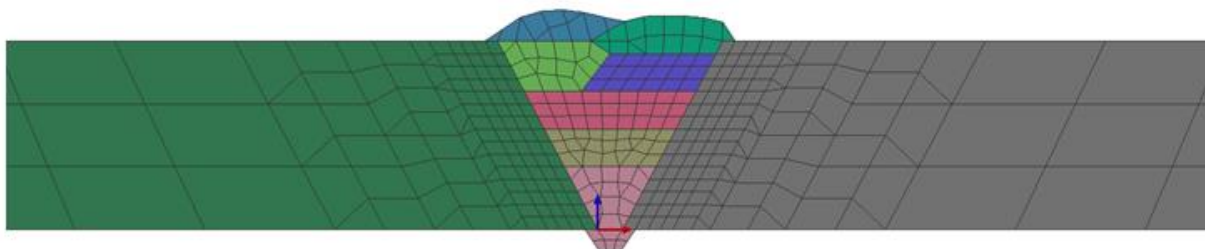


**Slika 57. Tlocrt modela**

Dobiveni model u izometriji prikazuje slika 58. Broj konačnih elemenata višestruko je manji u odnosu na model kreiran samo jednom veličinom konačnih elemenata, a istovremeno točnost dobivenog rezultata simulacija zadržana je.

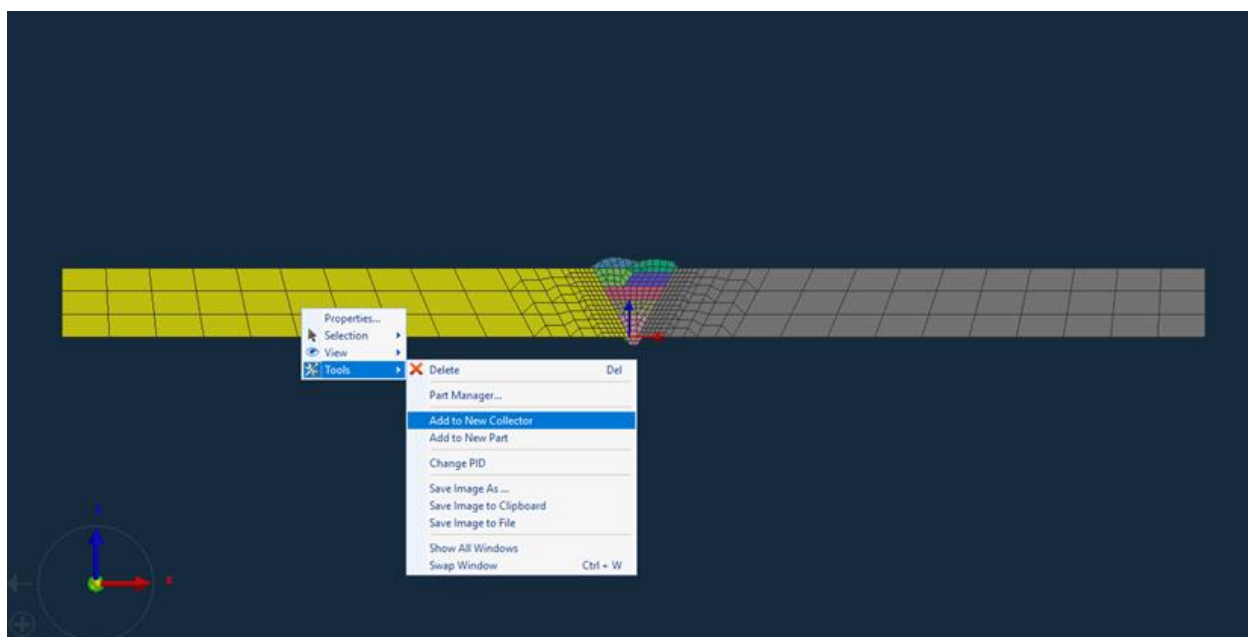
**Slika 58. Kreirani model spoja (izometrija)**

Također, prilikom izrade modela velika pažnja usmjeruje se na prolaze. Prilikom realnog zavarivanja rade se izmjere svakog prolaza te se pomoću njih izrađuju prolazi sličnih dimenzija i oblika u modulu Visual – Mesh (slika 59.). Na navedeni način, točnost simulacije, u odnosu na realan proces, dodatno se povećava.



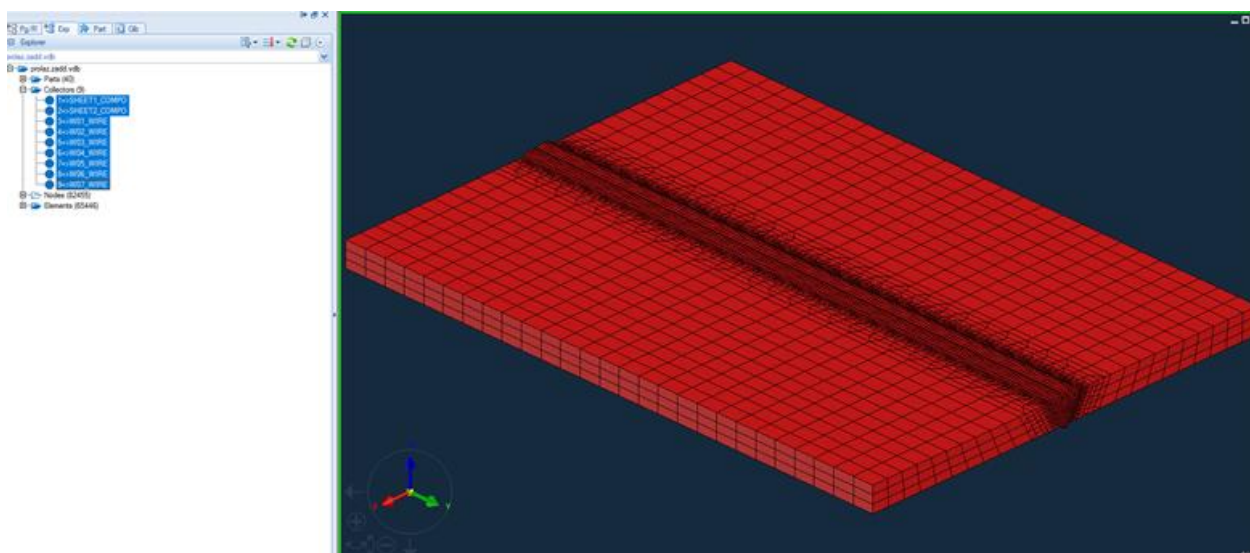
**Slika 59. Prikaz prolaza za simulaciju zavarivanja**

Nakon izrade modela, potrebno je definirati potrebne kolektore. Pomoću kolektora, programski paket raspoznava osnovni i dodatni materijal, definiraju se točke stezanja i površina izmjene topline te kolektori važni za unos topline. Postupak definiranja kolektora provodi se na sljedeći način: odabiru se svi željeni trodimenzionalni konačni elementi te se unutar opcije „Tools“ odabire podopcija „Add to New Collector“. Postupak izrade kolektora osnovnog materijala ploče 1 prikazan je slikom 60.



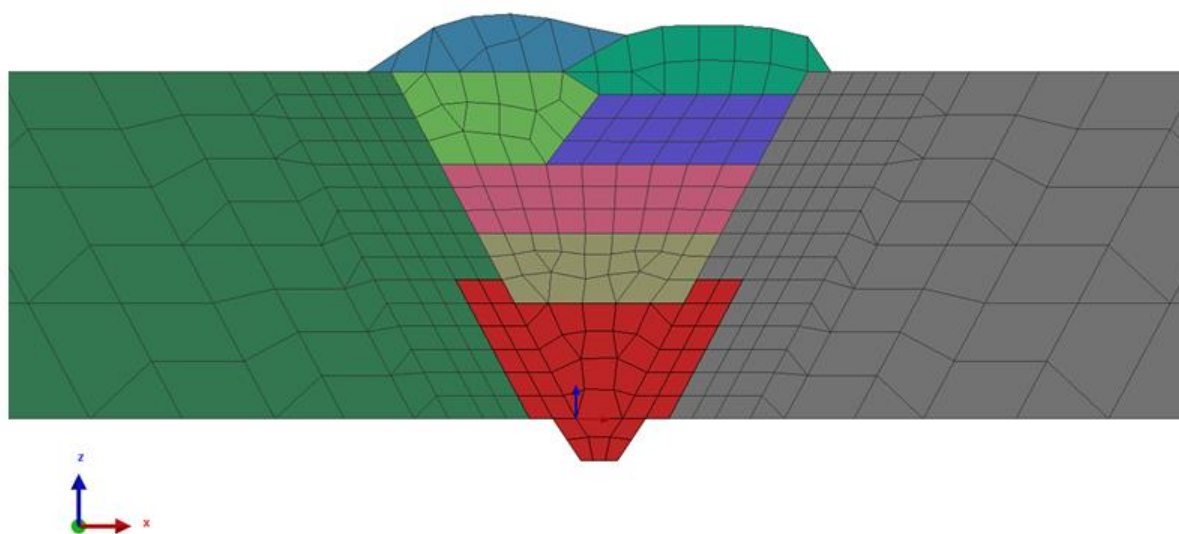
**Slika 60. Izrada kolektora osnovnog materijala ploče 1**

Na identičan način kreiraju se ostali kolektori potrebni za simulaciju: kolektor osnovnog materijala ploče 2 i kolektori dodatnog materijala. Sljedeći korak je preimenovanje kreiranih kolektora. Pomoću naziva, tj. ekstenzije, softver prepoznaje vrstu kolektora. Kolektorima osnovnog materijala pridodaje se ekstenzija „\_COMPO“. Na taj način, imena kreiranih kolektora osnovnog materijala glase: „SHEET1\_COMPO“ i „SHEET2\_COMPO“. Također, kolektore dodatnog materijala potrebno je preimenovati. Njima se pridodaje ekstenzija „\_WIRE“. Imena kreiranih kolektora dodatnog materijala glase: „W01\_WIRE“, „W02\_WIRE“, „W03\_WIRE“, „W04\_WIRE“, „W05\_WIRE“, „W06\_WIRE“ i „W07\_WIRE“. Izradom svih navedenih kolektora, softver prepoznaje cjelokupan model te prepoznaje koji trodimenzionalni konačni elementi predstavljaju dodatni materijal, a koji osnovni materijal. Slika 61. prikazuje izrađene sve kolektore dodatnog i osnovnog materijala.



**Slika 61. Izrađeni kolektori osnovnog i dodatnog materijala**

Sljedeći korak u Visual – Mesh-u je definiranje kolektora potrebnih za unos topline. Veličina tih kolektora ovisna je o geometrijskim značajkama, obliku i dimenzijama, samog metala zavora. Najčešće, kolektori potrebni za unos topline po veličini su veći od kolektora dodatnog materijala. Postupak izrade kolektora identičan je postupku izrade kolektora osnovnog i dodatnog materijala. Odabiru se željeni trodimenzionalni konačni elementi te se pomoću podopcije „Add to New Collector“ kreira kolektor. Izrada kolektora potrebnog za unos topline prolaza 1 vidljiva je na slici 62.

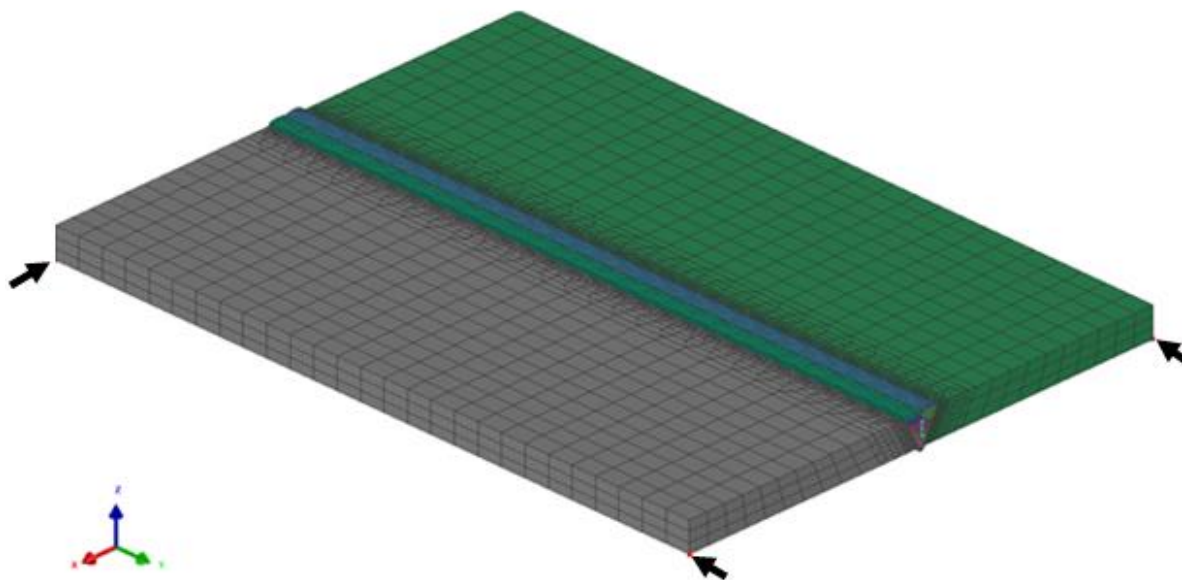


**Slika 62. Izrada kolektora potrebnog za izmjenu topline**

Postupak se ponavlja za preostale zavare. Odabiru se trodimenzionalni konačni elementi metala zavara pojedinog prolaza te konačni elementi uokolo samog zavara te se kreira kolektor. Izrađene kolektore potrebno je preimenovati da ih programski paket može raspoznati. Ekstenzija koja im se pridodaje glasi „*LOAD*“. Kod preimenovanja kolektora važno je da imena pojedinih kolektora potrebnih za unos topline odgovaraju imenima kolektora dodatnog materijala. Ukoliko smo kolektor dodatnog materijala prvog prolaza nazvali „*W01\_WIRE*“, na tom mjestu ime kolektora potrebnog za unos topline mora glasiti „*W01\_LOAD*“. Imena kreiranih kolektora potrebnih za unos topline glase: „*W01\_LOAD*“, „*W02\_LOAD*“, „*W03\_LOAD*“, „*W04\_LOAD*“, „*W05\_LOAD*“, „*W06\_LOAD*“ te „*W07\_LOAD*“.

Nadalje, potrebno je definirati kolektore stezanja. Iako je prilikom zavarivanja primjenjena zanemariva sila stezanja radnog komada, za potrebe programskog paketa nužno je primjeniti minimalnu silu stezanja. Za izradu kolektora stezanja ne odabiru se trodimenzionalni konačni elementi već samo točke. Odabire se opcija „*NODE*“ kojom odabiremo točku vanjskog vrha jedne od ploča. Prethodno navedenim postupkom, točka se dodaje kao kolektor pomoću opcije „*Add to New Collector*“. Također, kolektor je potrebno preimenovati i pridodati mu odgovarajuću ekstenziju da ga programski paket može prepoznati. Koristi se ekstenzija „*CLAMP*“ te ime kolektora glasi „*XYZ\_CLAMP*“.

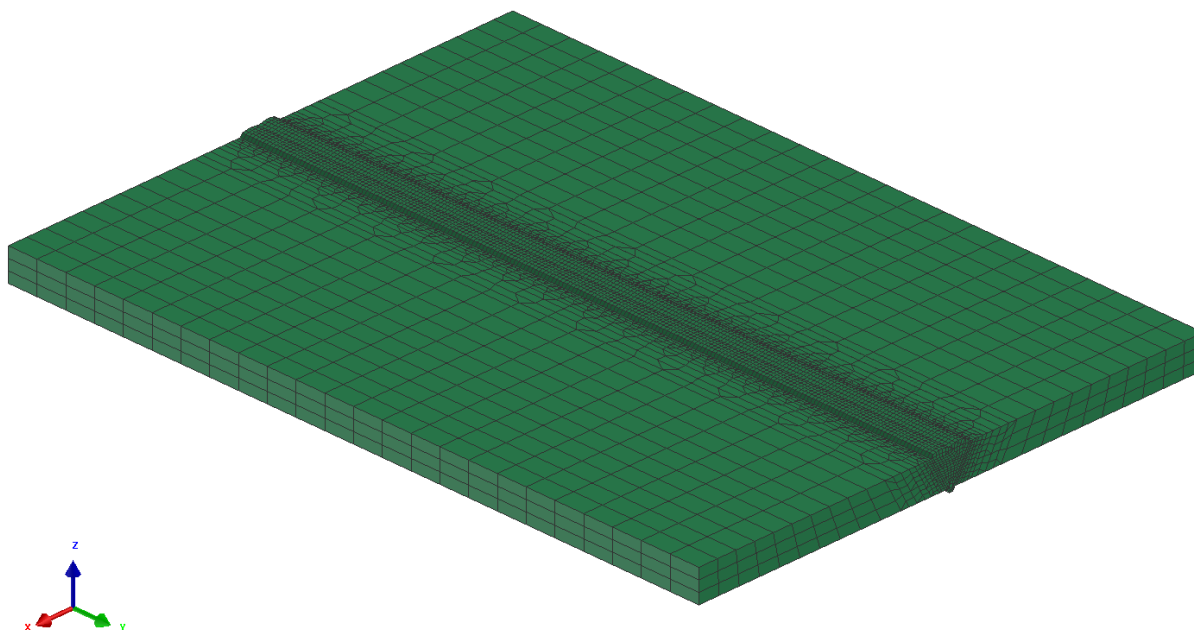
Postupak se ponavlja za još dvije točke (različite točke vanjskih vrhova) te ih se preimenuje u „YZ\_CLAMP“ i „Y\_CLAMP“ (slika 63.). Navedenim točkama stezanja, u kasnijim koracima simulacije, dodaju se nemogućnosti gibanja u osima prema njihovim imenima. Na taj način, onemogućava se slobodno pozicioniranje radnog komada u prostoru.



Slika 63. Kolektori stezanja

Posljednji kolektor kojeg je nužno definirati je kolektor izmjene topline. Izmjena topline se odvija između vanjske površine radnog komada i okoline. Zbog toga, potrebno je koristiti ljuskasti model, a ne trodimenzionalne konačne elemente. Postupak izrade ljuskastog modela sastoji se od odabira opcije „*Extract from 3D Mesh*“ u stupcu „2D“. Nakon odabira opcije otvara se novi prozor. U njemu, potrebno je ukloniti opciju „*Extract at Part Boundaries*“, odabrati „*Element face*“ te označiti sve dijelove modela. Potvrđivanjem opcije, kreira se novi, ljuskasti model, koji se, prethodno opisanim postupkom, dodaje kao novi kolektor. Također, kolektor je potrebno preimenovati, moguće ga je preimenovati u „AIR\_SKIN“ ili u „AIR\_HEAT\_EXCHANGE“.

Kreirani kolektor izmjene topline prikazuje Slika 64.



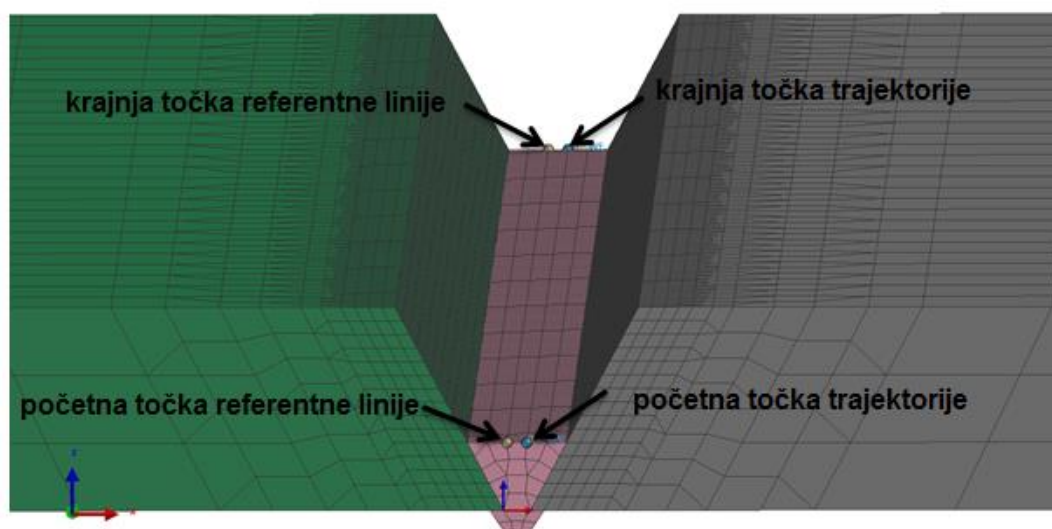
**Slika 64. Kolektor izmjene topline**

Nakon izrade svih potrebnih kolektora prelazi se u sljedeći modul programskog paketa, Visual – Weld. U njemu se kalibrira unos topline, unose parametri zavarivanja te izrađuje i pokreće simulacija zavarivanja.

### 5.2.2 Visual – Weld

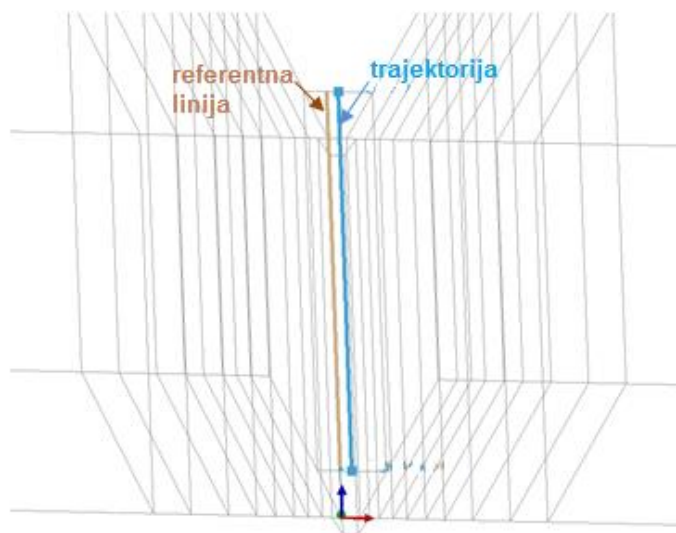
U modulu Visual – Weld provodi se kalibracija unosa topline, unose parametri zavarivanja te provodi sama simulacija. Prije kalibracije unosa topline, potrebno je definirati krivulju zavarivanja odnosno gibanja unosa topline. Budući da se simulira zavarivanje ravne ploče, krivulja gibanja unosa topline je pravac. Da bi se definirao pravac gibanja unosa topline, potrebno je definirati dvije linije: trajektoriju i referentnu liniju. Trajektorija se postavlja na površinu zavarivanja simetrično, ukoliko je to moguće, od krajeva zavarivanja (slika 65.). Referentna linija postavlja se, također, na površinu zavarivanja paralelno s trajektorijom. Postupak odabira opcije koja nam služi za definiranje navedenih pravaca je sljedeći: unutar stupca „*Welding*“ selektira se opcija „*Trajectory*“. Nakon odabira opcije, otvara se prozor u kojem pomoću opcije „*Start Node*“ pozicioniramo početne točke trajektorije i referentne linije. Opcijom „*End Node*“ pozicioniramo krajnje točke (slika 65.).





**Slika 65. Odabir početnih i krajnjih točaka trajektorije i referentne linije**

Između početnih točaka kreiraju se pravci (slika 66.). Kreirani pravci predstavljaju putanju gibanja unosa topline.



**Slika 66. Trajektorija i referentna linija prvog prolaza zavarivanja**

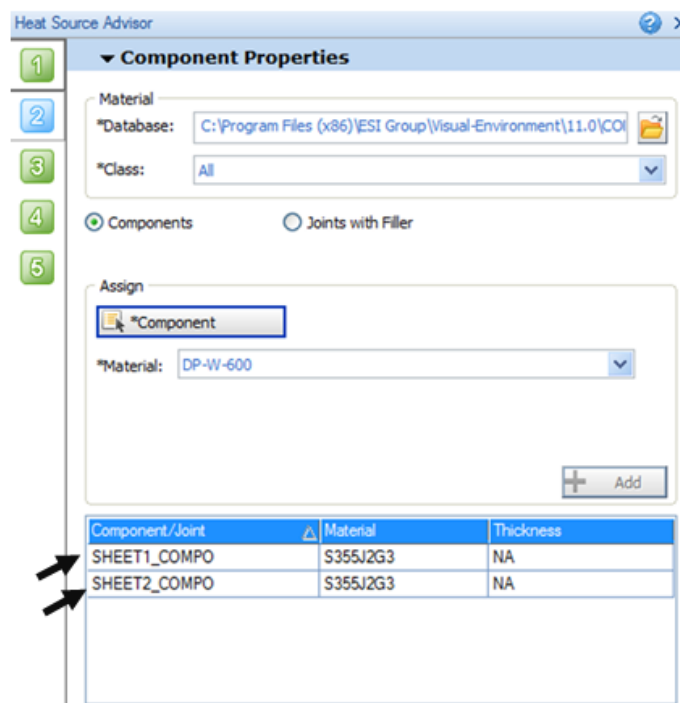
Opisani postupak izrade trajektorije i referentne linije ponavlja se za sve preostale prolaze. Postupak je identičan prethodno navedenom s izuzetkom odabira drugačijih početnih i krajnjih točaka.

### 5.2.2.1 Opcija „Heat Source Advisor“

Opcija „Heat Source Advisor“ koristi se za početnu kalibraciju izvora topline. Kao što je to prethodno navedeno, unos topline za svaki prolaz potrebno je kalibrirati na temelju makroizbruska. Zona protaljivanja približno odgovara temperaturi 1500 °C, a zona utjecaja topline odgovara rasponu temperatura od 800 °C do 1500 °C. Koristeći navedenu opciju, pokušava se uskladiti navedene raspone temperatura dimenzijama zona protaljivanja i zona utjecaja topline iz makroizbruska.

Prvi korak u opciji „Heat Source Advisor“ je definiranje imena projekta te radnog direktorija. Radi lakšeg snalaženja ime projekta odgovara rednom broju prolaza. Ukoliko se radi početna kalibracija unosa topline četvrtog prolaza, za ime projekta unosi se „4“.

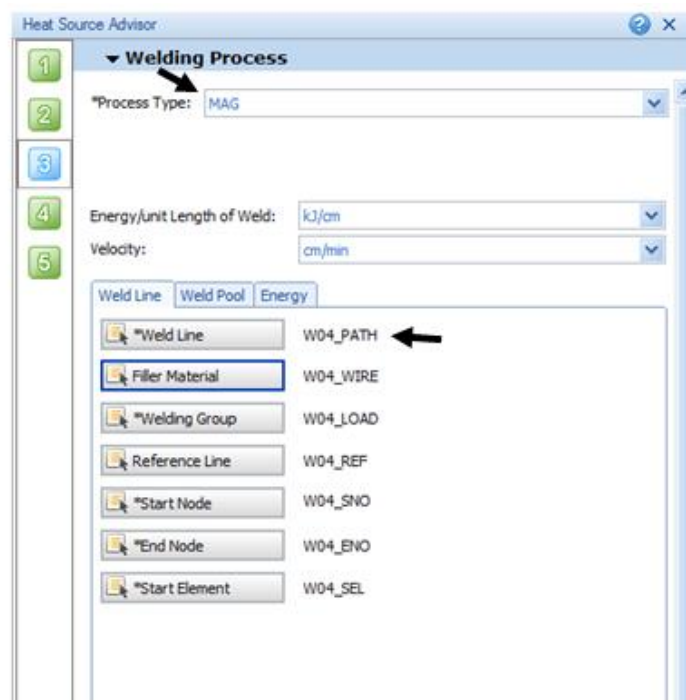
U sljedećem koraku definiramo vrstu osnovnog i dodatnog materijala. Budući da se realno zavarivanje provodilo na konstrukcijskom čeliku S355, potrebno je komponentama osnovnog materijala, „SHEET1\_COMPO“ i „SHEET2\_COMPO“, pridodati navedeni materijal (slika 67.). Također, ovisno o vrsti dodatnog materijala, koji se za pojedini spoj koristio, definira se vrsta dodatnog materijala.



Slika 67. Drugi korak opcije „Heat Source Advisor“



Treći korak predstavlja najvažniji korak u početnoj kalibraciji izvora topline. Korak se sastoji od tri stupca: „*Weld line*“, „*Weld pool*“ i „*Energy*“. U prvom stupcu, „*Weld line*“, odabire se tip procesa, odnosno izgled izvora topline (slika 68.). U ovom programskom paketu, izvor topline identičan je za sve postupke zavarivanja osim zavarivanja laserom i snopom elektrona. Zbog toga, za tip procesa moguće je odabrati MAG, REL ili neki drugi postupak neovisno o stvarnom postupku zavarivanja. Također, odabire se linija zavarivanja, „*Weld Line*“. Ukoliko su svi kolektori izrađeni na adekvatnim mjestima i preimenovani u odgovarajuća imena i ekstenzije, softver prepoznaje sve potrebne podatke za odabranu liniju zavarivanja. Naime, ako je odabrana linija zavarivanja „*W04\_PATH*“, softver prepoznaje da se na navedenoj liniji zavarivanja moraju nalaziti pripadajuće početne i krajnje točke zavara te adekvatan dodatni materijal.



Slika 68. „*Weld line*“

U sljedećem stupcu, „*Weld pool*“ definira se oblik izvora topline te brzina zavarivanja. Za brzinu zavarivanja unosi se stvarna brzina zavarivanja, 40 cm/min, a oblik unosa topline potrebno je kalibrirati na način da zona protaljivanja i zona utjecaja topline simulacije odgovaraju stvarnim zonama. slika 69. a) prikazuje kalibrirane vrijednosti četvrtog prolaza zavarivanja. Posljednji stupac „*Energy*“ služi za definiranje unosa topline (slika 69. b).

**a**

**b**

Joint	Source	Initial Time	End Time	Velocity	EPUL	Efficiency
W01_	1	0.000	12.161	40.001	15.000	1.000

Slika 69. Stupci : a) „Weld pool“, b) „Energy“

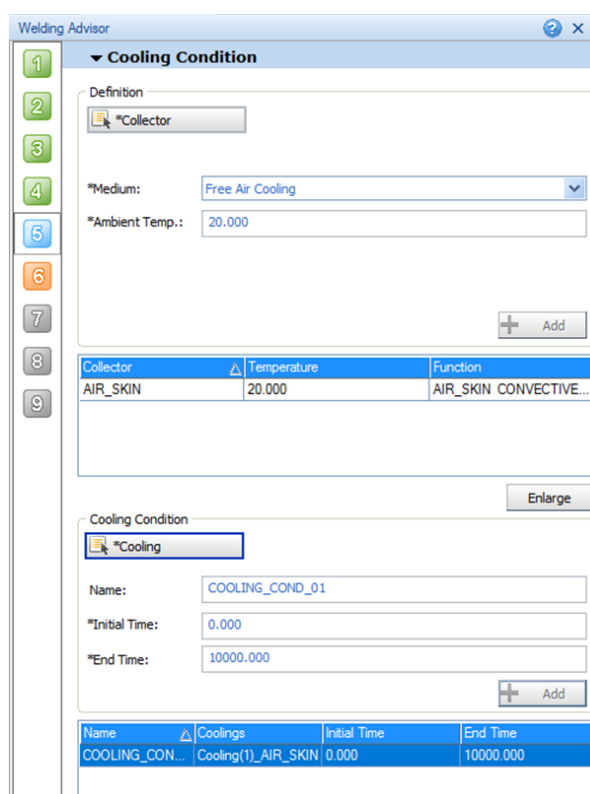
U četvrtom koraku definira se način hlađenja te okolišna temperatura. Zadnji korak služi za generiranje podataka, pokretanje simulacije te očitavanja rezultata. Nakon završetka simulacije, rezultati se očitavaju pomoću opcije „*Cross sectional view*“. Prije korištenja opcije, potrebno je unijeti podatke o temperaturi taljenja materijala (1500 °C) i temperaturi završetka zone utjecaja topline (800 °C). Ukoliko nas navedeni rezultat ne zadovoljava, vraćamo se na treći korak, drugi stupac te se modificiraju parametri izvora topline: „*Length*“, „*Width*“ i „*Penetration*“ do dobivenog rješenja. Postupak se ponavlja za sve prolaze. Početni kalibrirani unos topline četvrtog prolaza prikazuje slika 70. Na slici je vidljiva zona protaljivanja i zona utjecaja topline. Nedostatak opcije je nemogućnost istovremenog pokretanja više prolaza pa nije moguće vidjeti utjecaj jednog prolaza na drugi.



**Slika 70. Kalibrirani unos topline četvrtog prolaza**

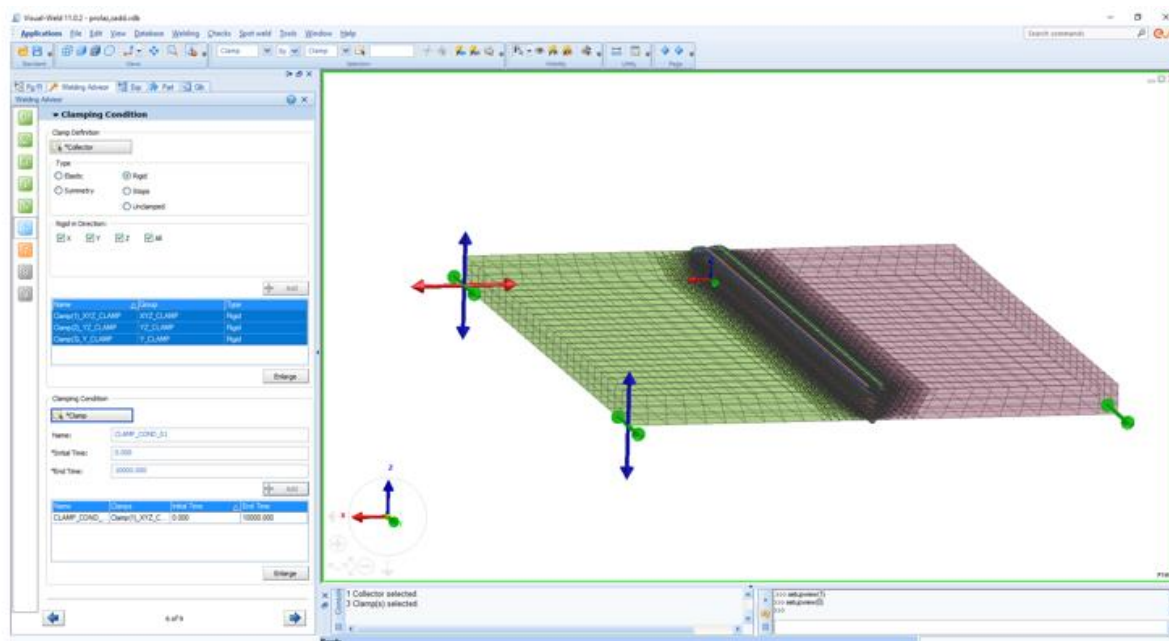
#### 5.2.2.1 Opcija „Welding advisor“

U opciji „Welding advisor“ vrši se konačna kalibracija izvora topline za svaki prolaz te vrši simulacija zavarivanja. Opcija se sastoji od devet koraka, od kojih je nekoliko identičnih onima iz prethodne opcije „Heat Source Advisor“. U prvom koraku, identično prethodnoj opciji, definira se ime projekta i radni direktorij. U drugom koraku definira se globalni parametar koji ima veliki utjecaj na točnost i vrijeme simulacije. Moguće je odabrati „Solid“ ili „Shell-Solid“ opciju. Opcija „Solid“ definira izvođenje simulacije potpunim modelom ispunjenim konačnim elementima dok opcija „Shell-Solid“ označuje simulaciju zavarivanja na modelu koji je kreiran konačnim i ljuskastim elementima. Trajanje takve simulacije je puno kraće, ali je i niže točnosti. Zbog toga, koristi se opcija „Solid“. Sljedeći korak je definiranje vrste dodatnog i osnovnog materijala. Korak je identičan koraku u opciji „Heat Source Advisor“. Četvrti korak je, također, identičan prethodnoj opciji. Sastoji se od tri stupca u kojima definiramo parametre unosa topline te liniju zavarivanja. Za svaki prolaz, upisuju se kalibrirane vrijednosti dobivene „Heat Source Advisor-om“. U petom koraku definiraju se uvjeti izmjene topline između radnog komada i okoline. Potrebno je odabrati kolektor izmjene topline „AIR\_SKIN“ te mu pridodati uvjete hlađenja: slobodno hlađenje na zraku te okolišnu temperaturu. Također, odabire se uvjet hlađenja („COOLING\_COND\_01“) te definira vrijeme početka i kraja izmjene topline. Kao završetak izmjene topline unosi se 10 000 s budući da sam proces zavarivanja traje dugo (slika 71.).



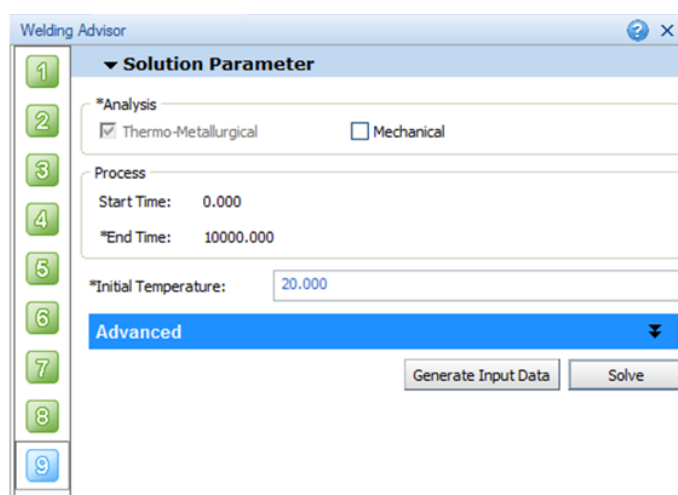
Slika 71. Uvjeti izmjene topline

U šestom koraku definiraju se uvjeti stezanja. Odabiru se svi kolektori stezanja („XYZ\_CLAMP“, „YZ\_CLAMP“, „Y\_CLAMP“) te se kao vrsta stezanja odabire kruto stezanje („Rigid“). Svakom kolektoru, ovisno o njegovom imenu, onemogućuje se gibanje u navedenim osima. Ukoliko je ime kolektora „XYZ\_CLAMP“, osi u kojima se onemogućiti gibanje su X, Y i Z. Postupak se ponavlja za preostale kolektore. Na taj način, obradku je onemogućeno gibanje u svim osima, tj. oduzeti su mu svi stupnjevi slobode gibanja. Nadalje, potrebno je definirati uvjete stezanja. Odabire se uvjet stezanja „CLAMP\_COND\_01“, za svaki kolektor stezanja, te definira početno i završno vrijeme. Navedeno vrijeme mora odgovarati vremenu izmjene topline. Definirane uvjete stezanja prikazuje slika 72.



Slika 72. Uvjeti stezanja

U sedmom i osmom koraku nije potrebno unositi promjene pa ih se preskače. U posljednjem, devetom, koraku definira se vrsta analize koja će se provesti te, eventualna, temperatura predgrijavanja radnog komada (slika 73.). Budući da je cilj završna kalibracija unosa topline, provodi se samo toplinsko – metalurška analiza. Generiraju se ulazni podaci te pokreće simulacija.

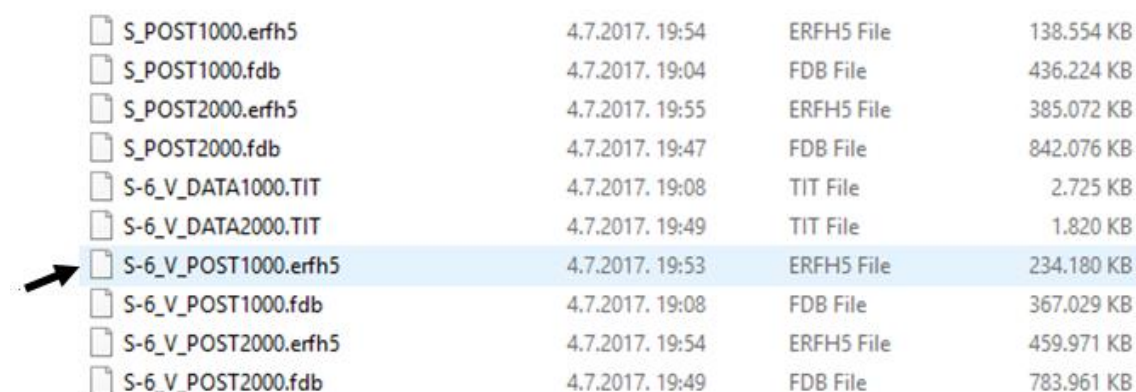












Slika 73. Posljednji korak „Welding advisor-a“

Nakon završetka simulacije, prelazi se u modul Visual – Viewer u kojem se očitavaju dobiveni rezultati.

### 5.2.3 Visual – Viewer

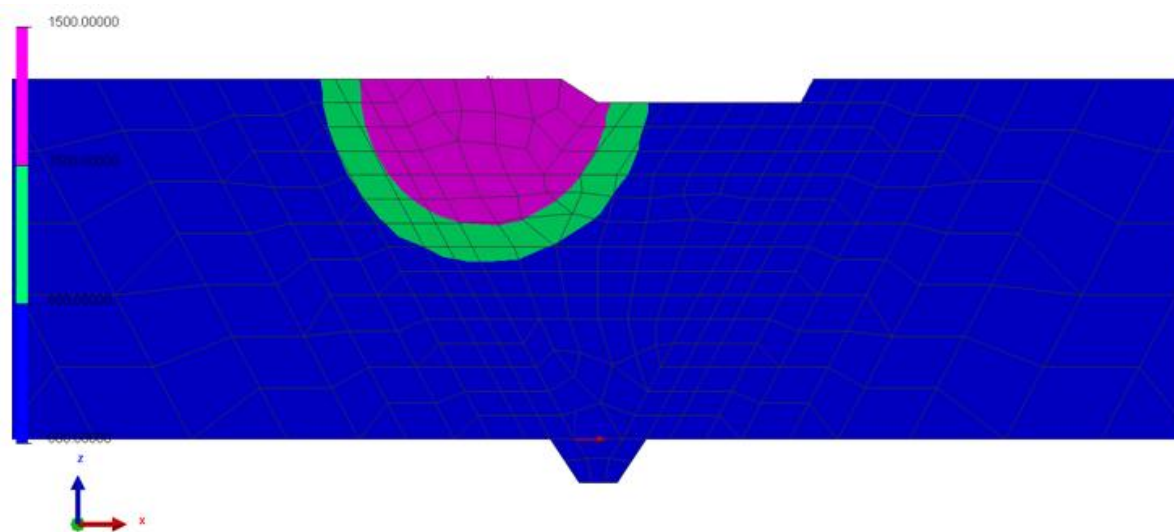
Visual – Viewer služi za očitavanje svih rezultata simulacije. Budući da smo pokrenuli samo toplinsko – metaluršku analizu te nas zanimaju dobiveni rezultati, potrebno je u navedenom modulu otvoriti datoteku s ekstenzijom *\_V\_POST1000.erfh5* (slika 74.).



	S_POST1000.erfh5	4.7.2017. 19:54	ERFH5 File	138.554 KB
	S_POST1000.fdb	4.7.2017. 19:04	FDB File	436.224 KB
	S_POST2000.erfh5	4.7.2017. 19:55	ERFH5 File	385.072 KB
	S_POST2000.fdb	4.7.2017. 19:47	FDB File	842.076 KB
	S-6_V_DATA1000.TIT	4.7.2017. 19:08	TIT File	2.725 KB
	S-6_V_DATA2000.TIT	4.7.2017. 19:49	TIT File	1.820 KB
	<b>S-6_V_POST1000.erfh5</b>	4.7.2017. 19:53	ERFH5 File	234.180 KB
	S-6_V_POST1000.fdb	4.7.2017. 19:08	FDB File	367.029 KB
	S-6_V_POST2000.erfh5	4.7.2017. 19:54	ERFH5 File	459.971 KB
	S-6_V_POST2000.fdb	4.7.2017. 19:49	FDB File	783.961 KB

**Slika 74. Odabir datoteke s rezultatima**

Nakon pravilnog odabira datoteke, potrebno je prikazati dobivene rezultate. Moguće je vidjeti raspored temperature svih točaka radnog komada u svakom trenutku procesa. Budući da se simulacija provodi s ciljem kalibracije izvora topline, potrebno je prikazati raspored temperature u zoni zavarivanja neposredno nakon početka zavarivanja svakog prolaza. Rezultati se prikazuju pomoću opcije „*Contour*“. Unutar opcije, radi lakšeg uočavanja uočavanja zone protaljivanja i zone utjecaja topline, potrebno je prilagoditi raspon vidljivih temperatura. Dobivene rezultate prikazuje slika 75.



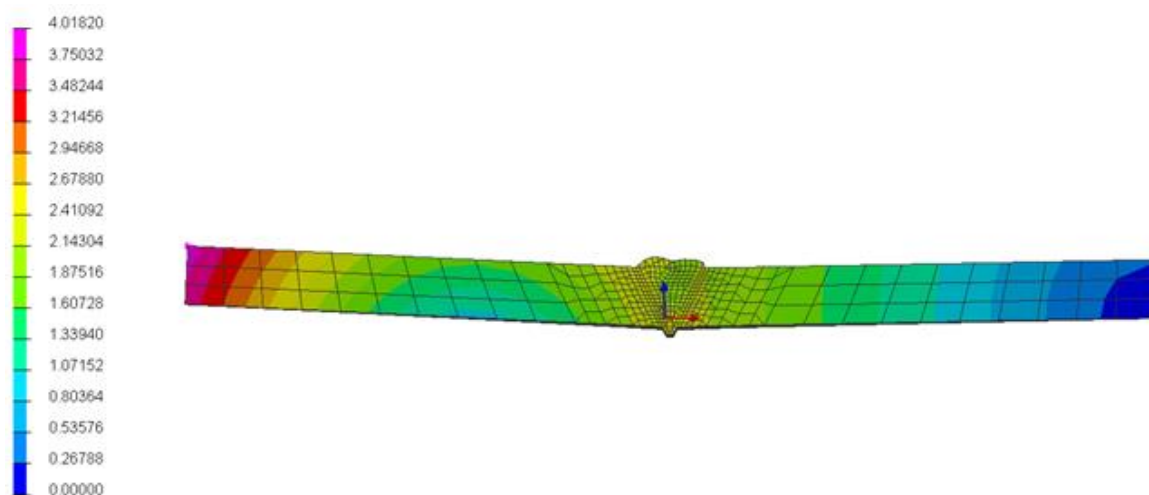
**Slika 75. Završna kalibracija petog prolaza**

Ukoliko jedan, ili više prolaza nisu adekvatno kalibrirani, tj. zona protaljivanja i zona utjecaja topline u simulaciji zavarivanja ne odgovara stvarnim zonama, vraća se u prethodni modul, Visual – Weld. Tamo se, u četvrtom koraku, unose promjene u dimenzijama izvora topline za navedene prolaze. Nakon toga, pokreće se simulacija te se, ponovno, očitavaju rezultati. Postupak se ponavlja sve dok svi prolazi nisu adekvatno kalibrirani. Kad zona protaljivanja i zona utjecaja topline svih prolaza odgovaraju stvarnim, također se vraća u prethodni modul, Visual – Weld. Tamo se, osim toplinsko – metalurške, pokreće i mehanička analiza.

Nakon završetka simulacije, ponovno se vraća u modul Visual – Viewer te se očitavaju dobiveni rezultati. Rezultati mehaničke analize spremljeni su u drugačiju datotetku, s ekstenzijom *\_V\_POST2000.erfh5*, pa je potrebno nju otvoriti. Rezultate koje je moguće očitati su različite vrste zaostalih naprezanja, deformacije te raspon čvrstoća kroz radni komad. U svakom trenutku procesa vidljive su vrijednosti navedenih rezultata. Takav pristup vrlo je koristan jer je moguće uvidjeti kad i na kojem mjestu se pojavljuju ekstremne vrijednosti rezultata.

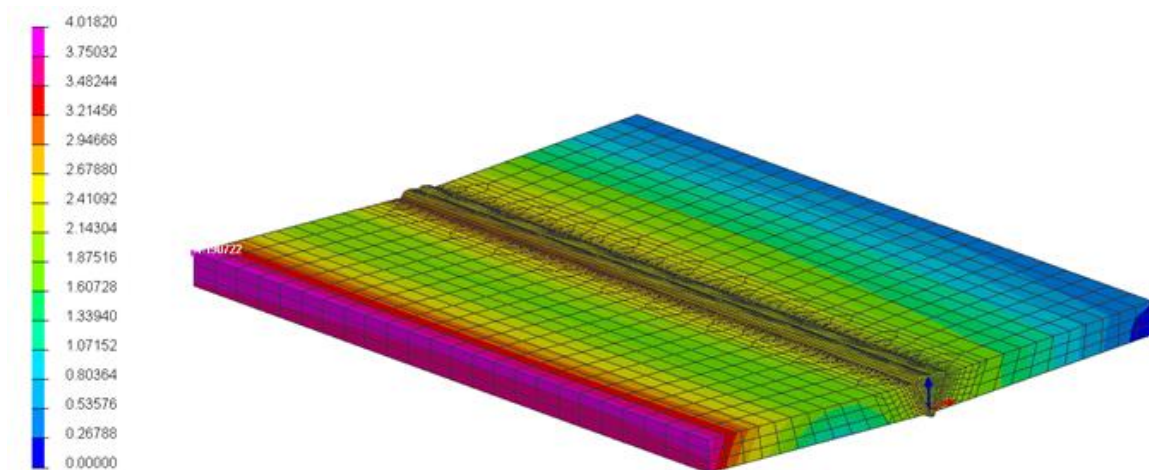
Zadatak ovog rada je usporediti realne vrijednosti deformacija sa simuliranim pa se u modulu Visual – Viewer prikazuju rezultati deformacija dobivenih nakon simulacije zavarivanja.

Slika 76. i slika 77. prikazuju dobivene deformacije nakon simulacije zavarivanja i ohlađivanja spoja 1 (dodatni materijal odgovara osnovnom materijalu). Maksimalni iznos deformacije iznosi 4,02 mm, a minimalni 0 mm u točki stezanja. Iznos deformacije postiže svoj maksimum u krajnjoj točki od lijevog ruba što približno odgovara realnoj dobivenoj vrijednosti. Ukoliko usporedimo simuliranu maksimalnu vrijednost deformacije s realnom, odstupanje iznosi 73,11 %. Mogući razlozi tolikog odstupanja su: neadekvatan model, kalibrirani izvori topline za pojedine prolaze ne odgovaraju stvarnima, nepoznato je stanje materijala (zaostala naprezanja) prije zavarivanja, simulirano odvođenje topline ne odgovara stvarnom odvođenju topline (ploča nije slobodna u zraku već smještena na stol), provedeno mjerenje deformacije rezultiralo je prevelikom netočnosti itd. Većim utjecajem na ulazne parametre u zavarivanju kao što su kompletna strojna obrada ploča, uzimanje materijala sa što manjim početnim zaostalim naprežanjima moguće je približiti rezultate. Neuskладnosti u pogledu izvora topline za svaki prolaz te odvođenja topline prilikom procesa, moguće je kompenzirati provođenjem većeg broja simulacija s ciljem kompenzacije navedenih ulaznih podataka. No, u ovom slučaju to nije bilo moguće zbog provođenja simulacije na računalu slabijih tehničkih karakteristika pa je vrijeme simulacije približno iznosilo 90 h.



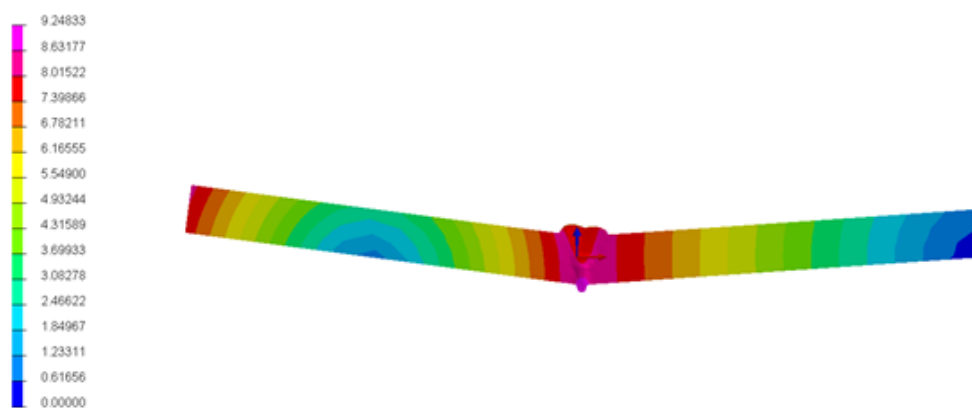
**Slika 76. Simulirane deformacije spoja 1**



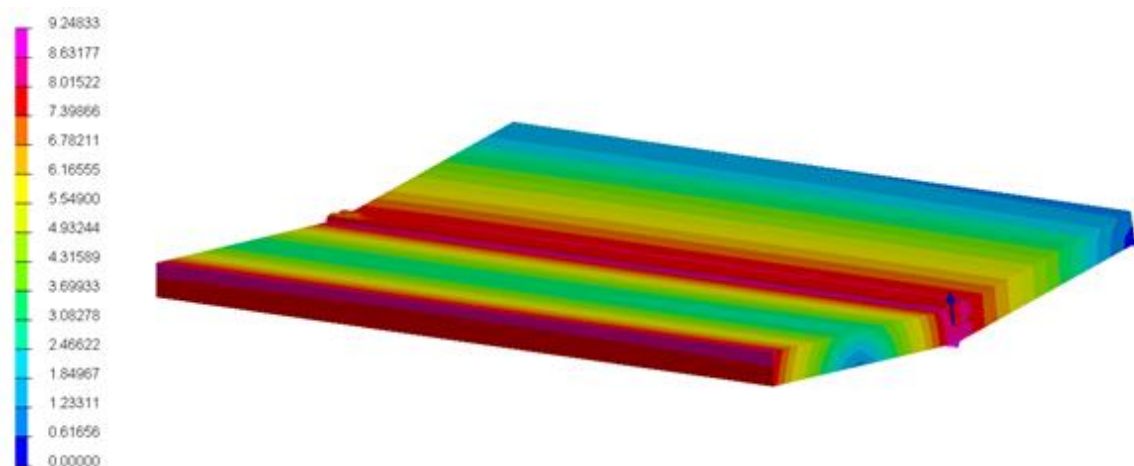


**Slika 77. Simulirane deformacije spoja 1 (izometrija)**

Slika 78. i slika 79. prikazuju rezultate dobivene nakon simulacije ukoliko se kao dodatni materijal koristi austenitni nehrđajući čelik. Maksimalni iznos deformacije iznosi 9,25 mm. Ukoliko usporedimo rezultat simulacije s realnom vrijednošću, odstupanje iznosi 58,16 %. Navedeno odstupanje je slično po iznosu spoja 1, vjerojatno zbog identičnih, prethodno navedenih razloga. Ukoliko usporedimo rezultat simulacije spoja 2 sa spojem 1, spoj 2 ima 130 % veći iznos deformacije. Takav iznos ne odgovara realnom odnosu vjerojatno zbog prethodno navedenih razloga.



**Slika 78. Simulirane deformacije spoja 2**



**Slika 79.** Simulirane deformacije spoja 2 (izometrija)

## ZAKLJUČAK

Zavarivanje je jedna od najvažnijih tehnologija spajanja. No, kao tehnologija, zavarivanje predstavlja vrlo složen i kompleksan proces. Procesom se u materijal unosi toplina koja prouzrokuje vanjske (deformacije, promjena boje materijala i sl.) i unutarnje (promjena mikrostrukture, tvrdoće, svojstva materijala te pojava zaostalih naprezanja) promjene. Djelovanjem na ulazne vrijednosti procesa moguće je pojedine promjene smanjiti na minimum. Deformacije su najnepovoljniji oblik vanjskih promjena u materijalu. Najčešći oblik sprečavanja deformacija je stezanje radnih komada. Iako se tim procesom smanjuju nastale deformacije, u materijalu zaostala naprezanja rastu. Zbog toga, cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj jednog od parametra tehnologije, vrste dodatnog materijala, na nastale deformacije.

U eksperimentalnom dijelu rada zavarena su tri para ploča konstrukcijskog čelika različitim dodatnim materijalima. Dodatni materijali koji su se koristili su: žica koja kemijskim sastavom odgovara osnovnom materijalu, praškom punjena žica koja kemijskim sastavom odgovara osnovnom materijalu te žica od austenitnog nehrđajućeg čelika. Dobivene deformacije, po iznosu, najniže su kod korištenja praškom punjene žice. Razlog tome je manji depozit u odnosu na punu žicu. Dobiveno nadvišenje je manje, pa su i sile stezanja manje. Najveće vrijednosti deformacije dobivene su korištenjem austenitnog nehrđajućeg dodatnog materijala. Razlog tome je veći koeficijent toplinskog rastezanja u odnosu na ostale dodatne materijale. Navedenim rezultatima zaključuje se da dodatni materijal ima visok utjecaj na deformacije. Treba težiti odabiru dodatnog materijala koji će zadovoljavati sve eksploatacijske uvjete, a pritom će iznos deformacije biti što niži.

U drugom dijelu eksperimentalnog rada vrijednosti stvarno dobivenih deformacija uspoređene su sa simuliranim. Koristio se programski paket „Visual – Environment“. Dobivene vrijednosti odstupaju od realnih zbog neadekvatne kalibracije svih ulaznih podataka. Također, vrijeme potrebno za samu pripremu i provođenje simulacije je preveliko. Zbog toga, zaključuje se da simulacija zavarivanja nije ekonomski primjenjiva za jednostavne radne komade već samo za konstrukcije u kojima i najmanje greške uzrokuju velike finacijske posljedice.

## LITERATURA

- [1] <http://charm.stanford.edu/Main/Resources>, dostupno 22.12.2015.
- [2] J. Sorić: *Metoda konačnih elemenata*, Golden Marketing – Tehnička knjiga; Zagreb, 2004.
- [3] <https://www.swantec.com/products/sorpas-3d/>, dostupno 04.01.2016.
- [4] <https://www.swantec.com/products/sorpas-3d/>, dostupno 05.01.2016.
- [5] <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/welding-assembly-simulation>, dostupno 05.01.2016.
- [6] M. Živčić, I. Remenar: *Zavarivanje – Tehnološke podloge unapređenja*; Zagreb, 1972.
- [7] Edward R. Bohnart: *WELDING – Principles and Practices*; McGraw – Hill Education, 2017.
- [8] B. Bauer.: *Postupci spajanja (Zaostala naprezanja i deformacije) – predavanje*, FSB Zagreb
- [9] [https://www.researchgate.net/profile/Linjie\\_Zhang6/publication/257338582/figure/fig5/AS:297592413016070@1447962968764/Fig-5-Distortion-pattern-of-the-welded-plates-a-Longitudinal-bending-of-LBW-b.png](https://www.researchgate.net/profile/Linjie_Zhang6/publication/257338582/figure/fig5/AS:297592413016070@1447962968764/Fig-5-Distortion-pattern-of-the-welded-plates-a-Longitudinal-bending-of-LBW-b.png), dostupno 07.05.2017.
- [10] Z. Feng: *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*; Cambridge, England
- [11] [https://www.researchgate.net/profile/Swarup\\_Bag/publication/288020569/figure/fig8/AS:316650621554695@1452506799972/Fig-8-Distortion-pattern-of-the-welded-plates-a-along-the-transverse-direction-b.png](https://www.researchgate.net/profile/Swarup_Bag/publication/288020569/figure/fig8/AS:316650621554695@1452506799972/Fig-8-Distortion-pattern-of-the-welded-plates-a-along-the-transverse-direction-b.png), dostupno 07.05.2017.
- [12] <https://www.slideshare.net/cswamy07/distortion-in-welding-58550615>, dostupno 08.05.2017.
- [13] [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na\\_dipl4/9.pdf](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/9.pdf), dostupno 16.05.2017.
- [14] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Zagreb, 2002.
- [15] HRN EN 1011 – 2
- [16] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, dostupno 17.05.2017.
- [17] <http://blog.daihen-usa.com/blog/how-to-select-the-right-filler-metal>, dostupno 25.5.2017.
- [18] Miller Duane K.: *Welding Inovation vol. XIV - Use Undermatching Weld Metal Where Advantageous*; 1997.

- [19] [http://www.daihen-varstroj.si/shared\\_files/Katalogi/katalog2012\\_arv\\_slo.pdf](http://www.daihen-varstroj.si/shared_files/Katalogi/katalog2012_arv_slo.pdf), dostupno 10.06.2017.
- [20] <http://au.rs-online.com/web/p/ir-thermometers/0411980/>, dostupno 25.06.2017.
- [21] <http://www.askaynak.com.tr/en/products/welding-consumables/tig-rods/as-tig-sg2>, dostupno 25.06.2017.
- [22] [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU\\_MIGWires-LNM-LNM309LSi/LNM309LSI-ENG.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNM309LSi/LNM309LSI-ENG.pdf), dostupno 25.06.2017.
- [23] [http://www.itwwelding.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/Produkte/Produktinfo\\_EN/MF\\_5\\_0R\\_en.pdf](http://www.itwwelding.de/fileadmin/user_upload/PDF/Produkte/Produktinfo_EN/MF_5_0R_en.pdf), dostupno 26.06.2017.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**